



**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA
DE MINAS Y ENERGÍA**



Trabajo de Fin de Grado

**Estudio comparativo del método de tuneladora vs
explosivos para rampa minera en Barruecopardo
(Salamanca)**

**Comparative study of the tunnel boring machine vs
explosive method for mining ramp in Barruecopardo
(Salamanca)**

Para acceder al título de:

Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros

Autor: Alejandro Somarriba Fernández

Directores: Noemí Barral Ramón y Raúl Husillos Rodríguez

Convocatoria: Febrero 2019



**Estudio comparativo del método de
tuneladora vs explosivos para
rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)**



Dedicatoria

A mis padres por haberme permitido cumplir un sueño.



Agradecimientos

A mis tutores, por toda la información y ayuda recibida.

A mis padres, por haberme regalado palas en miniatura cuando era pequeño.

A Laura, por todo el apoyo que me ha dado a lo largo de estos años.

A Pedro, por aguantarme como compañero desde infantil.

A los excelentes compañeros con los que he compartido grandes cosas estos, Celia, Daniel, Inés, María, Pedro y Ruth. Gracias a ellos ha sido todo más fácil.

A Rubén, por estar siempre en su despacho cuando me ha surgido cualquier duda.

A mis compañeros en Cobre Las Cruces, por aconsejarme en detalles del proyecto y permitirme trabajar en una rampa similar a la que se plantea este proyecto.



**Estudio comparativo del método de
tuneladora vs explosivos para
rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)**



Índice



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	7
2. OBJETIVO	8
3. ESTUDIO DEL ARTE	10
3.1. EXCAVACIÓN CON EXPLOSIVOS	10
3.2. EXCAVACIÓN MECÁNICA CON MÁQUINAS PUNTUALES	11
3.3. EXCAVACIÓN CON MÁQUINAS INTEGRALES NO PRESURIZADAS	14
3.4. EXCAVACIÓN MECÁNICA CON MÁQUINAS PRESURIZADAS (TBMS PRESURIZADAS)	16
4. ZONA DE ESTUDIO	18
4.1 SITUACIÓN GEOGRÁFICA	19
4.2 GEOLOGÍA DE SALAMANCA	20
4.2.1 Estratigrafía	22
4.3 CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO DE BARRUECOPARDO	24
4.3.1 Geotecnia del macizo rocoso	28
4.4 CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS	34
4.5 HIDROGEOLOGÍA SUPERFICIAL	35
4.6 MEDIO AMBIENTE	36
5. MÉTODO DE COMPARATIVA DE LOS MÉTODOS EN ESTUDIO	37
5.1 METODOLOGÍA	37
5.1 TRAZADO	37
5.2 AFECCIÓN AL TERRENO	38
5.3 TIEMPO DE EJECUCIÓN	38
5.4 COSTES DE OPERACIÓN	39
5.5 SEGURIDAD	39
5.6 VENTILACIÓN	39
5.7 RENDIMIENTO	40
6. PROPUESTAS A ANALIZAR Y DETERMINACIÓN DEL TRAZADO	41
6.1. ANÁLISIS DE LA COMPARATIVA	43
6.2. RESULTADOS	44
6.2.1. Maquinaria	44



**Estudio comparativo del método de
tuneladora vs explosivos para
rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)**



6.2.2. Voladura	45
6.2.3. Ventilación.....	50
7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	55
8. BIBLIOGRAFÍA	56
9. PLANOS.....	58



1. INTRODUCCIÓN

El Trabajo de Fin de Grado es el documento en el cual el alumno debe de poner en práctica todos los conocimientos teóricos y prácticos aprendidos a lo largo del transcurso de su formación, demostrando de esta manera que es poseedor de los conocimientos atribuidos a su perfil profesional, en este caso, ingeniero.

Por tanto, se trata del primer trabajo de carácter profesional que debe desarrollar el alumno. Realizando de una investigación, desarrollo de un proyecto o la resolución a un problema de ingeniería. Esto llevara al alumno a desarrollar una labor de búsqueda de información técnica, confección de planos, realización de ensayos que aporten información al proyecto, cálculos, aplicación de la mejora continua y finalmente la interpretación de todos los datos recabados, a fin de seleccionar el mejor resultado técnico desde el punto de vista de un profesional.

De este modo, la situación escogida para este Trabajo Fin de Grado es el estudio comparativo entre avance por perforación y voladura frente a la excavación mediante el uso de tuneladora con la finalidad de realizar la ejecución de una rampa de transporte principal en el yacimiento de Barruecopardo. Esta mina se desea desarrollar una mina a través de una explotación subterránea que permita la extracción del mineral. Esto se debe a que la antigua explotación a cielo abierto no es económicamente rentable.

La reapertura de esta explotación supondría la obtención de Wolframio, un material bastante escaso en la corteza terrestre y con grandes aplicaciones en el mundo de la ingeniería debido a sus propiedades mecánicas y conductoras.

Este hecho, suscita el desarrollo de un proyecto, en el que se deberán de tener en cuenta los conocimientos aprendidos en la antigua explotación a cielo, así como todos los conocimientos técnicos recogidos durante años en documentación la documentación técnica. Se trata de un proyecto que unifica muchas temáticas como son: geología, geotecnia, mecánica de fluidos, laboreo de minas, etc.

Por todo ello, este estudio se ha centrado en el estudio de estas dos metodologías técnicas, dado que ambas rivalizan en el ámbito de la ejecución de túneles o galerías en rocas duras.



Estudio comparativo del método de tuneladora vs explosivos para rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)



2. OBJETIVO

Este Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo principal la ejecución de una rampa que dé acceso a la explotación de mineral en el yacimiento de Barruecopardo situada en el municipio del mismo nombre.

La construcción de esta galería facilitará la explotación de la mineralización más profunda del yacimiento, que en la antigua mina no fue posible explotar mediante la minería a cielo abierto. En este nuevo plan de regreso a la actividad en el yacimiento se plantea emplear para la ejecución de la explotación el método de subniveles (Sublevel Stopping).

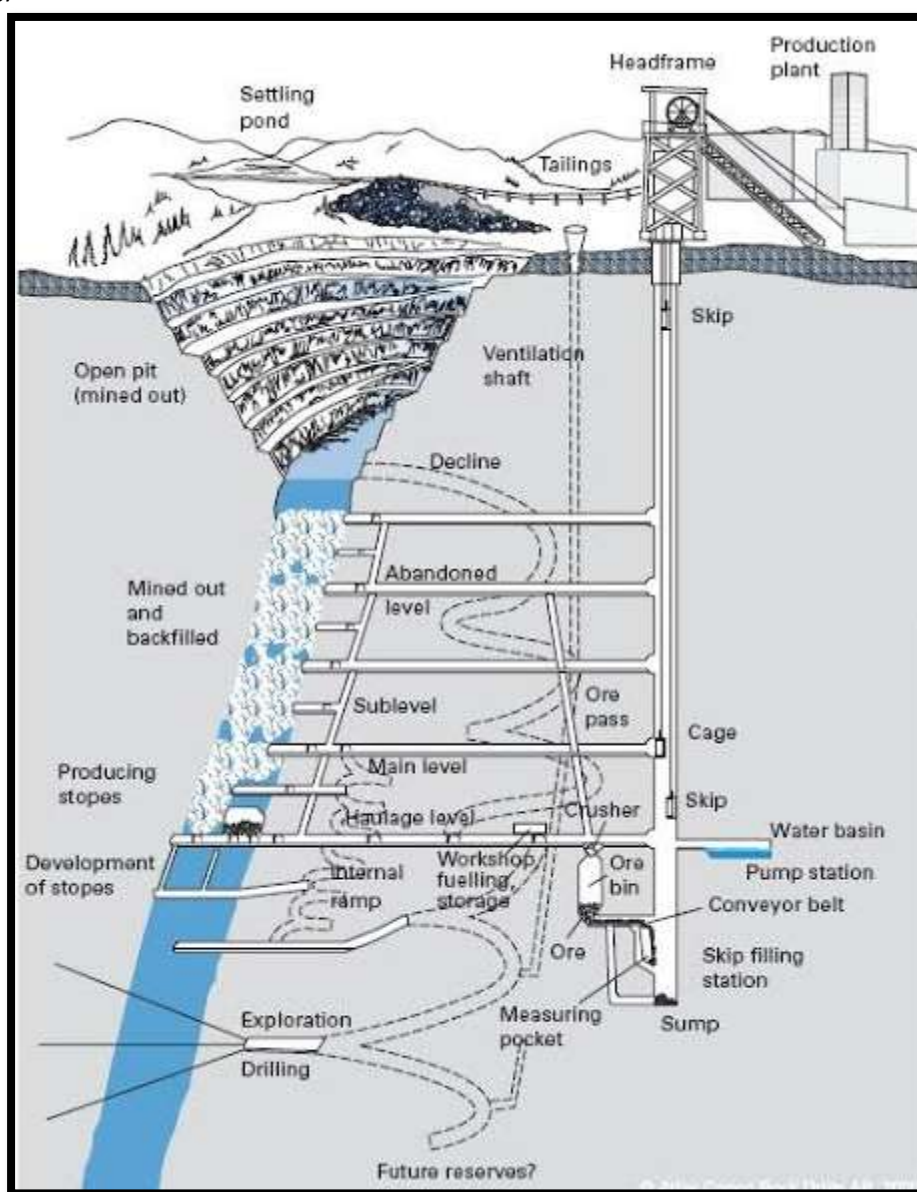


Figura 2.1: Aplicación del método Sublevel Stopping (NG Nair, 2019)^[18].



Esto supondrá un estudio de toda la estructura, capacidad portante de la roca, aguas subterráneas, la adecuada geometría del desarrollo minero interior, así como todos aquellos aspectos necesarios para la ejecución de la obra: radios y pendientes para un transporte seguro, sistemas de evacuación de aguas y dimensionado del sistema de ventilación.

Esta cantidad de información será clave en el objetivo final de este proyecto, que es realizar una comparativa entre el método de avance con perforación y voladura o mediante el empleo de tuneladora. Se obtiene por tanto la solución óptima para este yacimiento minero.



3. ESTUDIO DEL ARTE

Los métodos de excavación subterránea de túneles actuales ofrecen un sinfín de posibilidades. Considerando la metodología básica que emplean, se pueden clasificar en los cuatro grandes grupos, que a continuación se describen. El detalle de la metodología de uno u otro grupo se hará más adelante, donde se centrará la atención en las dos metodologías objeto de este estudio. Ahora solo se aportarán unos conocimientos básicos sobre las diferentes metodologías.

3.1. EXCAVACIÓN CON EXPLOSIVOS

Este método durante muchos años ha sido el método más empleado para la excavación de túneles en rocas de dureza media o alta, hasta el punto de que se conocía también como Método convencional de excavación de túneles.

Actualmente se sigue empleando cuando se trata de túneles de comunicación, o conducciones hidráulicas de gran longitud, así como en la ejecución compleja subterránea con obras de muy diversas dimensiones y formas, que se construyen en macizos de rocas matrices duras o muy duras y principalmente en áreas no urbanas, como puede ser el caso de una mina. Aunque hoy en día, en los países desarrollados, es frecuente el uso de la excavación mecánica, para túneles de gran longitud. Desplazando en muchos casos a la excavación con explosivos.

Las razones de este abandono son varias figurando en primer lugar el impacto medioambiental, unido a la exigencia general sobre seguridad e higiene laborales, deben figurar en primer lugar. No cabe duda de que hoy es difícil de justificar el uso de explosivos en túneles próximos a áreas habitadas debido al rechazo por parte de la población por los trastornos que este ocasiona.

Por otra parte, las exigencias legales de salubridad e higiene del trabajo son elevadas en la mayoría de los países y suponen un sobre coste que precisa ser compensado con altos rendimientos, que se aproximen, al menos, a los obtenidos por las máquinas integrales (TBMs), lo que es difícil de conseguir. Hay que considerar también la dificultad de formar buenos especialistas y el terrorismo como una razón adicional, que obliga a imponer duras exigencias en el uso de explosivos comerciales, a fin de impedir su obtención ilegal.

Finalmente, los costes de adquisición de equipos se sitúan hoy día por debajo de los de las TBMs, pero superan, en general, los de las Máquinas puntuales a las que se hace referencia a continuación (López Jimeno, 2011)^[14].



Figura 3.1: Ciclo de Perforación y Voladura (Putzmeister, s.f.)^[20].

3.2. EXCAVACIÓN MECÁNICA CON MÁQUINAS PUNTUALES

Se consideran incluidos aquí todos los sistemas de avance por corte mecánico, excluyendo solo las máquinas integrales (TBMs).

En definitiva, se consideran en este grupo los túneles que se avanzan con máquinas rozadoras; con Excavadoras, generalmente hidráulicas; con Tractores y cargadoras (destrozadoras) e, incluso, con herramientas de mano, generalmente hidráulicas o eléctricas.



Estudio comparativo del método de tuneladora vs explosivos para rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)



Figura 1.2: Minador en la mina de Sallent (Sandvik, s.f.)^[23].

- Modalidad A: Sostenimientos flexibles

Hay un elemento común en la utilización de sistemas basados en la aplicación de soluciones flexibles (bulones, cerchas y hormigón proyectado), siguiendo la Sistemática del Nuevo Método Austriaco de Túneles (NATM), del que toma el nombre esta modalidad.

La tendencia actual para terrenos de calidad media, medio-baja, es al empleo preferente del hormigón proyectado exclusivamente. En muchos países este conjunto de métodos se conoce más como Shotcrete Method, que como NATM. Causado por la gran acogida que ha tenido el método y el uso de ambas expresiones para designar una cierta manera de hacer sostenimientos.

Los rendimientos dependen mucho de la calidad geotécnica del macizo, pero los costes de adquisición de equipo son mucho menores que los de las TBMs, y menores, en general, que los del equipamiento para explosivos. Si a esto se une que, en los países desarrollados, prácticamente todos los tipos y modelos pueden conseguirse en alquiler o con fórmulas de recompra asegurada, es clara la ventaja económica y, por ello, el que este grupo de métodos sea el más utilizado hoy en día en túneles no muy largos y situados en zonas urbanas o en sus proximidades.

La única limitación práctica de este Subgrupo de métodos está en los casos de terrenos altamente inestables (Suelos no cohesivos, túneles bajo freático, etc.). Lo que recomienda pasar, al menos, a la modalidad B siguiente (López Jimeno, 2011)^[14].



- Modalidad B: Sostenimiento provisional con “Escudo”

Los mismos sistemas de corte (rozadora, martillo pesado o cucharas excavadoras y herramientas manuales) pueden emplearse trabajando al amparo de una coraza o escudo que facilita el sostenimiento provisional. La estructura sobre la que se monta el sistema de desplazamiento del escudo soporta, además, los medios de corte mecánico con sus sistemas de accionamiento (si la excavación está mecanizada) y, si es el caso, los de colocación del sostenimiento/ revestimiento definitivo.

Lo que caracteriza básicamente esta modalidad es el sistema mecánico de sostenimiento provisional del terreno con un escudo, por muy simple que sea éste (pudiendo incluir aquí las llamadas entibadoras, hoy día, en la práctica, abandonadas) y pese a la enorme variedad de sus formas y sistemas.

Hay que señalar, en cambio, que no se mantienen las facilidades de mercado. El escudo se encarga para un determinado proyecto y suele ser un prototipo de una marca comercial determinada: por ello, no existen las facilidades comerciales de tipo alquiler o análogas. No obstante, para prototipos poco sofisticados, el coste no es muy elevado y ello, unido a que puede haber máquinas usadas en venta, hace que esta opción deba considerarse siempre, sobre todo si se trata de secciones convencionales (carretera de 2 carriles, metro de simple o doble vía, etc.).

Finalmente, esta alternativa para el empleo de máquinas puntuales nace de la posibilidad de tratar rocas blandas y suelos que presenten inestabilidad señalada en túneles de poca longitud, cada vez más frecuentes en las obras de infraestructura urbana (López Jimeno, 2011)^[14].

- Variantes a las Modalidades A y B

En primer lugar, y en lo que a la Modalidad A se refiere, deben mencionarse los que pueden llamarse tipos de sostenimiento pesado que, aparte de perfiles normalizados de gran sección, en el caso de cerchas, comprenden los métodos siguientes: Bulones autoperforantes (que permiten inyectar a través del cuerpo metálico perforado del bulón); paraguas de columnas de “jet grouting” y paraguas de micropilotes metálicos (de tuberías de acero de diámetro de 3” hasta 8” y espesor creciente).

Por otra parte, en el caso de secciones de tamaño medio y, sobre todo, grande (más de 70m²), se han empleado últimamente en el caso de frentes altamente inestables, métodos indirectos de sostenimiento, consistentes en el tratamiento del frente con anclajes horizontales de fibras, en mallas de 0,5 x 0,5 m y de longitud suficiente para abarcar varios módulos de avance, logrando así su “autosostenimiento”. Una vez colocados los anclajes, se ejecuta el avance de un módulo a sección completa y de 2 a 4 m de longitud, como máximo, y a continuación su revestimiento con hormigón en masa de gran espesor.



Ambas modalidades A y B, para los casos de alta inestabilidad y, sobre todo, cuando se ha de trabajar con carga de agua permanente tienen la posibilidad de adoptar técnicas complementarias especiales de sostenimiento, que básicamente consisten en la presurización total del túnel, o bien la congelación del terreno.

Ambas tienen sus dificultades y limitaciones. Por eso, el protagonismo que alcanzaron en el pasado no existe hoy en día, si bien hay que mencionar todavía hoy, su empleo en casos particulares (López Jimeno, 2011)^[14,15].

3.3. EXCAVACIÓN CON MÁQUINAS INTEGRALES NO PRESURIZADAS

La característica común de este grupo de métodos es que la excavación del túnel se realiza a sección completa, empleando las máquinas integrales (en inglés fullface tunnel machines) abiertas o “no presurizadas”. Otro rasgo común es que, en general, la sección de excavación es circular.

- TBMs convencionales para roca o “Topos”

Son las máquinas que, a partir de 1955-60, iniciaron la competencia del corte mecánico de rocas duras frente a los métodos de arranque con explosivos. Su desarrollo ha sido constante desde entonces y siguen teniendo un alto grado de empleo. Se resume a continuación el principio de su funcionamiento:

La parte estática de la máquina se fija contra las paredes del túnel por medio de codales extensibles (grippers), lo que permite crear un fuerte empuje axial sobre la cabeza giratoria (par de giro Mg) contra la roca del frente. El corte mecánico de la roca se logra por la combinación de esfuerzos axiales y tangenciales que se aplican por medio de cortadores de disco de metal duro, montados en la cabeza y que giran libremente sobre sus ejes.

A partir de este principio, los diseños han evolucionado, desde los años 60, para lograr máquinas que puedan trabajar en condiciones cambiantes del terreno. En las máquinas de última generación se ha resuelto plenamente el bulonado muy próximo al frente; no así la proyección de hormigón (cuya proyección no se ha logrado iniciar a menos de cuatro diámetros del frente). Los sistemas de colocación de cerchas ensayados no han resuelto el problema cuando la inestabilidad del terreno es relevante (grado IV e incluso III), que son los casos que justifican este tipo de sostenimiento (López Jimeno, 2011)^[14].

- TBMs convencionales para suelos o “Escudos”

En el caso de suelos (o de rocas blandas) no es posible trabajar con grippers a causa de la baja competencia del terreno. Por otra parte, este requiere una aplicación inmediata del sostenimiento que, prácticamente, consiste en anillos metálicos o de hormigón armado, aplicados al perímetro total de la sección, lo que se hace al amparo de una estructura laminar de acero (el escudo) que envuelve a la máquina.



Se mantiene el mismo tipo de funcionamiento de las TBMs de roca, pero aquí el esfuerzo axial contra el frente se crea por el empuje de varios gatos hidráulicos contra los anillos de sostenimiento, siendo el resto de los procesos de corte análogo al descrito para rocas duras. Sólo cambian las herramientas de corte, que en este caso son cinceles con corazas o picas con bordes de metal duro, o bien simples incrustaciones de metal duro en la estructura de la cabeza de la máquina (López Jimeno, 2011)^[14].

- Escudos para roca (TBMs “escudadas”)

Como bien puede comprenderse, en muchos casos el terreno presenta cambios notables de características, en los que es posible encontrar formaciones muy diferentes, con rocas de naturaleza y estructura geológica totalmente distintas.

Como ya se ha comentado, el gran desarrollo tecnológico, tanto de las TBMs de roca como, sobre todo, de los Escudos, ha conseguido máquinas de gran versatilidad. Así, es normal hoy día que un escudo, aunque básicamente trabaje en rocas blandas, pueda atravesar intercalaciones de dureza notable, como son las calizas o areniscas de resistencias próximas a los 100 MPa. Por su parte, en TBMs de roca se han ensayado prototipos que permiten el hormigonado simultáneo al avance (aunque con bajo rendimiento) o modelos con corazas del tipo de los escudos, si bien empleando grippers.

Estos son los dos tipos de máquinas abiertas para rocas de todo tipo que, por el momento, son la solución más adecuada para los túneles de gran longitud en los que el trazado atraviesa macizos a cotas profundas (“túneles de base”), lo que dificulta un conocimiento detallado o, simplemente, que discurre a través de formaciones con zonas de alteración conocidas. Ambos tipos, colocan, a lo largo de todo el túnel, un revestimiento, generalmente de anillos de hormigón armado, de geometría constante y cuantía de armadura variable, de acuerdo con el estudio de los tipos de terreno, con el fin de que sirvan, a la vez de sostenimiento.

La primera solución consiste en escudos abiertos con ruedas de corte dotadas de herramientas para roca y suelos, que completan el avance de cada módulo con la colocación del correspondiente anillo, sumando los tiempos parciales de cada operación.

La otra solución son las tuneladoras del tipo “Doble escudo”, que pueden definirse como máquinas alojadas en una coraza o escudo, usualmente dividido en dos cuerpos. El escudo anterior lleva alojados los grippers, empleados para avanzar en roca dura, y el posterior los gatos perimetrales para avanzar como escudo. Cuando avanza en rocas que permiten el uso de los grippers la colocación de cada anillo se simultánea con la excavación del módulo, por lo que este tipo de máquina permite reducir los plazos y costes globales, lo que le ha dado una gran aceptación (López Jimeno, 2011)^[14].



Figura 3.3: Tipología de TBM's (Schmaeh, 2015)^[24].

3.4. EXCAVACIÓN MECÁNICA CON MÁQUINAS PRESURIZADAS (TBMS PRESURIZADAS)

La baja competencia del terreno suele asociarse a casos de alta inestabilidad y presencia de niveles freáticos con cota superior a la del eje del túnel. La primera solución aplicada a los Escudos mecanizados abiertos para trabajar en estas condiciones fue la Presurización total del túnel, técnica ya comentada. No obstante, las dificultades de esta hicieron que se desarrollasen, exclusivamente dos tipologías específicas de presurización de la cabeza. Son las siguientes:

Los Hidroescudos (Hydroshields): en los que se inyectan lodos bentoníticos en la cámara de la cabeza, que forman con el producto de la excavación una mezcla viscosa, que se mantiene a presión para estabilizar el terreno del frente. Por otra parte, esta mezcla es bombeable, por lo que se impulsa hasta el exterior con una bomba de lodos, para separar el escombros del lodo y recuperar éste que, de nuevo, se bombea para incorporarlo a la cámara de cabeza.

Los Escudos de presión de tierra (Earth Pressure Balance Machines o E.P.B.Ms): en los que el material excavado, junto con productos químicos de adición, y agua (si hay que aumentar la propia del terreno) forman una mezcla plástica, que se mantiene a presión contra el frente para lograr su estabilidad, y que, para no perder la presión en la cámara, se extrae por un tornillo sinfín que la vierte sobre cintas y vagones ordinarios.

En general, los Hidroescudos son las máquinas más adecuadas para los materiales poco cohesivos (rocas arenosas o suelos granulares) por la dificultad de separación de los materiales cohesivos de los lodos de transporte. A su vez, su empleo en túneles urbanos tiene dificultades crecientes por el impacto ambiental que produce la eliminación del escombros.

Todo ello hace que, actualmente, en los países desarrollados, las máquinas más frecuentes sean las E.P.B.Ms, sobre todo en obras urbanas o próximas a ciudades.

Desde el punto de vista de los costes las TBMs no suelen estar en el mercado de alquiler. Lo que existe es una buena red de información para adquisición de máquinas usadas



que, en todo caso, se adaptan para usar en el nuevo proyecto. Debe decirse también que es cada vez más frecuente la subcontratación a empresas muy especializadas, que disponen de parques de máquinas de gran importancia (López Jimeno, 2011)^[14].



Estudio comparativo del método de tuneladora vs explosivos para rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)



4. ZONA DE ESTUDIO

La mina de Barruecopardo, en la que se ubica este estudio, se encuentra en el municipio de Barruecopardo. Este municipio se encuentra en la zona noroeste de la provincia de Salamanca, Castilla y León. Situándose cerca de la zona fronteriza con Portugal. Dentro del Municipio de Barruecopardo, la mina se encuentra a cuatro kilómetros del núcleo urbano del pueblo que da nombre al municipio.

En esta zona conocemos las diferentes litologías gracias a 25 sondeos de los que conocemos sus coordenadas. Estos sondeos serán necesarios para el modelado del terreno a fin de conocer la forma de la mineralización. Las coordenadas de los collares de estos son:

Tabla 4.1: Coordenadas de los sondeos que se emplearan en la modelización del terreno.

Nombre del Sondeo	Coordenada X	Coordenada Y
BR-1	695860,99	4547578,1
BR-2	696061,46	4547578,25
BR-3	696260,72	4547578,3
BR-4	696460,7	4547578,85
BR-5	696660,94	4547578,21
BR-6	695861,33	4547378,5
BR-7	696061,03	4547378,06
BR-8	696260,99	4547379,35
BR-9	696461,11	4547378,21
BR-10	696661,31	4547378,58
BR-11	695860,76	4547178,5
BR-12	696061,31	4547177,99
BR-13	696261,11	4547178,21
BR-14	696460,16	4547178,66
BR-15	696660,84	4547178,38
BR-16	695861,11	4546978,01
BR-17	696060,98	4546978,34
BR-18	696261,23	4546978,4
BR-19	696460,89	4546977,74
BR-20	696661,01	4546978,43
BR-21	695860,77	4546778,42
BR-22	696061,44	4546778,54
BR-23	696261,23	4546777,99
BR-24	696461,06	4546777,96
BR-25	696661,02	4546778,21



Los sondeos nos han caracterizado una masa mineral de 10 millones de metros cúbicos, los cuales son el objetivo de la explotación subterránea a la que va dirigida la rampa que se definirá en este estudio.

Tabla 4.2: Ejemplo de información obtenida de los sondeos.

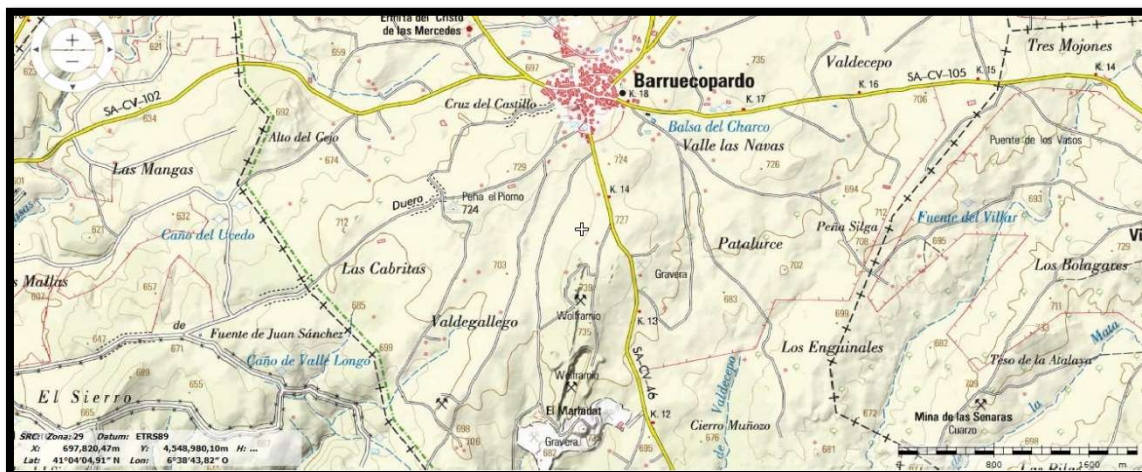
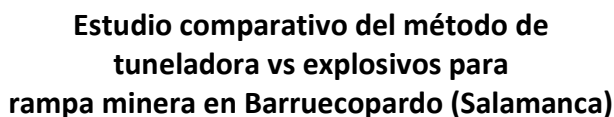
Nombre Sondeo	BR-7
Coordenada X	696061,03
Coordenada Y	4547378,06
Coordenada Z	704,25
Dirección	-
Inclinación	Vertical

Longitudes			
Desde	Hasta	Litología	Ley %
0	17	Recubrimiento	
17	39	Filón de Cuarzo rico en scheelita.	0,81
39	62	Filón de Cuarzo rico en scheelita.	0,75
62	83	Granito	
83	109	Granito	
109	134	Granito	
134	156	Granito	
156	178	Granito	
178	204	Granito	
204	235	Granito	
235	247	Granito	

4.1 SITUACIÓN GEOGRÁFICA

La zona de estudio se encuentra enmarcada dentro de la hoja de Vilvestre (449) del Instituto Geográfico Nacional (Instituto Geográfico Nacional, s.f.)^[7]. Esta hoja está situada en el norte de la provincia de Salamanca, en el límite de la comarca del Campo Charco con los Arribes del Duero y con Portugal.

El relieve de la zona es suave y alomado, con excepción de los fuertes encajamientos situados hacia el oeste de la Hoja producidos por el Río Duero y afluentes como el Río Agueda y el Río Huebra. Las altitudes varían entre los 600 y 750 m. Los mayores relieves positivos se corresponden a las alineaciones de “sierros” (Cerro de Peñahorcada, 837 m), mientras que los encajamientos del Duero y Huebra alcanzan desniveles próximos a los 400 m.



La red hidrográfica, pertenece a la cuenca del Duero, está fuertemente condicionada por las direcciones estructurales del diaclasado y de la fracturación de los materiales, principalmente granitos. El curso fluvial más importante es el Río Duero, que constituye el límite político con Portugal. Sus principales afluentes en el área son los ya mencionados Ríos Agueda y Huebra, y el Río de las Uces.

Comprende territorios pertenecientes a 19 términos municipales y sobre ella se asientan 13 núcleos de población, el mayor de ellos es Barruecopardo, con 1113 habitantes, capital económica de la comarca.

Todos los pueblos y aldeas están comunicados por carretera, cuya red es aproximadamente radial con centro en Barruecopardo; la existencia de gran cantidad de pistas y de antiguos caminos hace que se pueda llegar a cualquier punto de la Hoja con relativa facilidad.

El uso del terreno está controlado por la litología y la morfología. Los suelos son delgados y se asientan mayoritariamente sobre rocas silíceas. Los cultivos de cereales se establecen en las zonas en las que no hay ni abundancia de roca ni excesivo encharcamiento. En las zonas arboladas los robles se sitúan en los lugares de mayor pluviosidad y humedad, mientras que las encinas lo hacen preferentemente en laderas orientadas al sur.

“Geológicamente el área de estudio se encuadra dentro de la Zona Centro ibérica del Macizo Ibérico (Julivert, 1972; Farías, 1987). El basamento está formado por dos conjuntos metasedimentarios separados por discordancia y por un gran volumen de rocas graníticas hercínicas que intruyen en ellos. El primero de los conjuntos está formado por metasedimentos pelíticos-samíticos con intercalaciones de cuarcíticas,



metaareniscas feldespáticas y de rocas calcosilicatadas de edad preordovícica, perteneciente al Complejo Esquisto-Grauváquico de (D'Costa, 1950), o también denominado “Complejo del Alamo” por (García De Figuerola, 1975), además de formar parte de la Serie Superior definida por (Robles Casas Y Álvarez Nava, 1988) en el área de Las Hurdes-Ciudad Rodrigo o correlacionable con las formaciones de Monterrubio y Aldeatejada del sur de Salamanca (Díez Balda, 1980-1982). El segundo conjunto, de edad Ordovícico inferior, está formado por cuarcitas y pizarras de edad Tremadoc-Arenig.” (Cartografía del Instituto Geológico y Minero de España, s.f.)^[3].

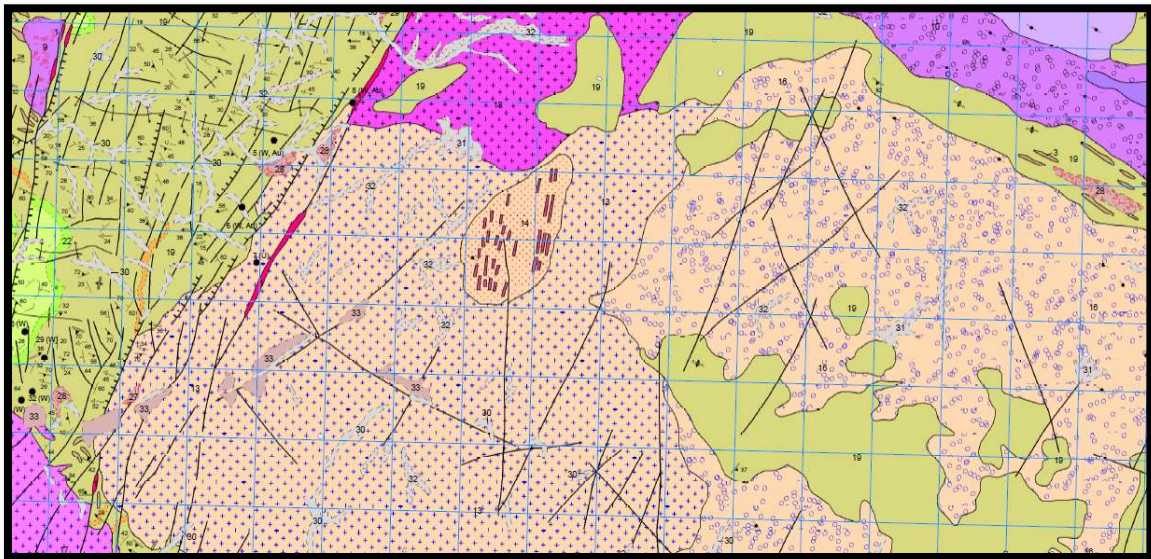


Figura 4.2: Mapa geológico de la zona de estudio (Cartografía del Instituto Geológico y Minero de España, s.f.)^[3].

Las rocas ígneas son de tipo granítico a excepción de los macizos de rocas básicas e intermedias que afloran según una directriz NO-SE que se han clasificado en las siguientes unidades:

- Granito biótico porfídico de grano medio a grueso, foliado (La Peña).
- Rocas básicas e intermedias.
- Granitos porfíricos de grano grueso a muy grueso, biotíticos a dos minas (Mieza-Cabeza de Caballo).
- Granitos-Leucogranitos de dos micas de grano medio a fino (Milano y Fuentes de Masueco).
- Granito de dos micas con textura “Ala de Mosca” heterogranular de grano medio a grueso (La Zarza de Pumareda).
- Granito de dos micas con textura “Ala de mosca” equigranular de grano medio (Río Huebra).
- Granito de dos micas con textura “Ala de Mosca” heterogranular de grano medio a fino (Mieza).
- Granito de dos micas, de grano grueso (Picones).



Estudio comparativo del método de tuneladora vs explosivos para rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)



- Granito de dos micas, porfidico, de grano grueso-muy grueso (Barreras-Saldeana).
- Granito Leucocrático de dos micas, equigranular de grano medio (Saucelle).
- Pórfidos graníticos ácidos.

4.2.1 Estratigrafía

En todo el ámbito de la Zona Centro ibérica (Julivert, 1972; Farias, 1987) se pueden considerar dos conjuntos litológicos: uno inferior de edad preordovícica compuesto por ortogneises y metasedimentos, y otro superior de edad Ordovícico-Carbonífero Inferior, que descansa de forma discordante sobre el anterior, el cual está constituido fundamentalmente por rocas siliciclásticas. Recientemente, en ambos conjuntos han sido distinguidos cuatro grandes megaciclos (Azor, 1992).

El primer ciclo comprende los materiales del Precámbrico Superior-Cámbrico. Los primeros depósitos de los que se posee registro son referibles a la sedimentación en una plataforma siliciclástica somera con episodios carbonatados (Arche, 1977; González Lodeiro, 1981). Durante el depósito existe una actividad volcánica importante (Navidad y Peinado, 1976) representada por niveles de porfiroides metavolcanicos que se sitúan en diferentes niveles de la serie y se produce, fundamentalmente, la instrucción de un gran volumen de granitos mayoritariamente pórfidos cuyas edades varían entre 618 t 540 Ma (Lancelot, 1985; Vialette, 1986-1987; Wildberg, 1989).

Esta actividad magmática esta probablemente relacionada con momentos tardíos de la orogenia Panafricana (Lancelot, 1985; Vialette, 1986; Wildberg, 1988), en el que las rocas metavolcánicas representarían un vulcanismo de tipo explosivo emplazado en cuencas de extensión continental con posterioridad al engrosamiento cortical (Navidad, 1992).

Además de este episodio magmático, hay otro posterior alrededor de los 470 Ma de naturaleza alcalina, que posiblemente esté relacionado con una fase distensiva preordovícica (González Lodeiro, 1980; Lancelot, 1987). No se han encontrado hasta el momento estructuras de deformación asociadas al primer episodio magmático, no obstante, su existencia se considera probable. Las Formaciones Capas de Mediana y Capas de Santa María situadas en los niveles altos de la serie del Complejo Esquisto-Grauváquico que aparece en el Sistema Central Español (Álvarez, 1982), descansan probablemente discordantes sobre los metasedimentos en los que intruyen los protolitos de los ortogneises. Esta discordancia sería correlacionable con la que se observa en la parte meridional de la ZCI y al S de Salamanca entre el Alcudiense inferior y el Alcudiense Superior o Grupo Domo Extremeño y, según el caso, Grupos de Ibor y Valdelacasa (Ortega y González Lodeiro, 1986; Ortega, 1988; Díez Balda, 1991).



El segundo ciclo se inicia con el depósito de un conjunto de materiales discordantes sobre su sustrato. Esta discordancia corresponde a los movimientos sárdicos (Lotze, 1956) y ha sido identificada en varios puntos de la ZCI (Capote, 1972; González Lodeiro, 1982; Barrera, 1989), e incluso recientemente al O de Salamanca (Hoja de Villavieja de Yeltes, 476) en el marco del presente Proyecto Magna. A partir del Ordovícico inferior tiene lugar la implantación de una extensa plataforma siliciclástica en la que localmente se depositan niveles volcánicos de edad Llanvirn-Llandeilo (Pérez-Estaún, 1978).

Como consecuencia del juego de fallas normales activas relacionables a una tectónica extensional y la creación de nuevos relieves, inicialmente la sedimentación presenta variaciones importantes en espesores y facies. Las relaciones estratigráficas con el sustrato del Complejo Esquisto-Grauváquico infrayacente son variadas: paraconformes, discordancias angulares y a menudo a través de una superficie de discontinuidad jalonada con brechas sinsedimentarias. Los ambientes sedimentarios son igualmente variados: aluviales, fluvio-deltaicos, fluvio-mareales y marinos someros, a menudo con componentes volcánicos procedentes del magmatismo asociado a fallas activas en el borde de la cuenca. A partir del Arenig la sedimentación se homogeneiza y la sedimentación en la plataforma pasa a ser dependiente principalmente de las variaciones eustáticas del nivel del mar, de las que se reconocen varios ciclos.

En el Ordovícico Superior se depositan turbiditas (Formación Agüeira) interpretadas en relación con el desarrollo de fallas asociadas con la extensión de un margen continental (Pérez-Estaún y Marcos, 1981). Recientemente, se proponen que esta tectónica extensional es activa en la parte oriental del Antiforme de “Ollo de Sapo” desde el Ordovícico Medio, los cambios de espesores y facies del Paleozoico inferior y la laguna estratigráfica de amplitud variable observada entre estos materiales y los suprayacentes de edad Silúrica.

El tercer ciclo incluye el Silúrico y el Devónico Inferior. Se inicia con el depósito transgresivo de materiales detríticos en un medio de plataforma somera y es característica la presencia de facies sedimentarias euxínicas en el Silúrico Inferior. En el flanco occidental del Antiforme del Ollo de Sapo y en el Sinforme de Alcañices se intercalan además materiales volcánicos cuya abundancia da cuenta de una intensa actividad relacionada con la persistencia y aceleración de la distensión cortical (Vacas y Martínez Catalán, 1987).

El cuarto ciclo está representado por los materiales del Devónico Superior-Carbonífero Inferior, que descansan discordantes sobre materiales del tercer ciclo en núcleos de los sinclinales de Sil-Truchas y Sinforme de Alcañices (Quiroga, 1982; Antona y Martínez Catalán, 1990). Estos materiales corresponden a depósitos turbidíticos sinorogénicos semejantes a la Facies “Culm” (Formación San Clodio (Pérez-Estaún, 1974); y Formación San Vitero (Quiroga, 1982), presentan una edad coincidente con los primeros movimientos de la Orogenia Hercínica, están afectados por todas las fases de



Estudio comparativo del método de tuneladora vs explosivos para rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)



deformación y presentan un metamorfismo en grado bajo (Barrera, 1989; Antona y Martínez Catalan, 1990).

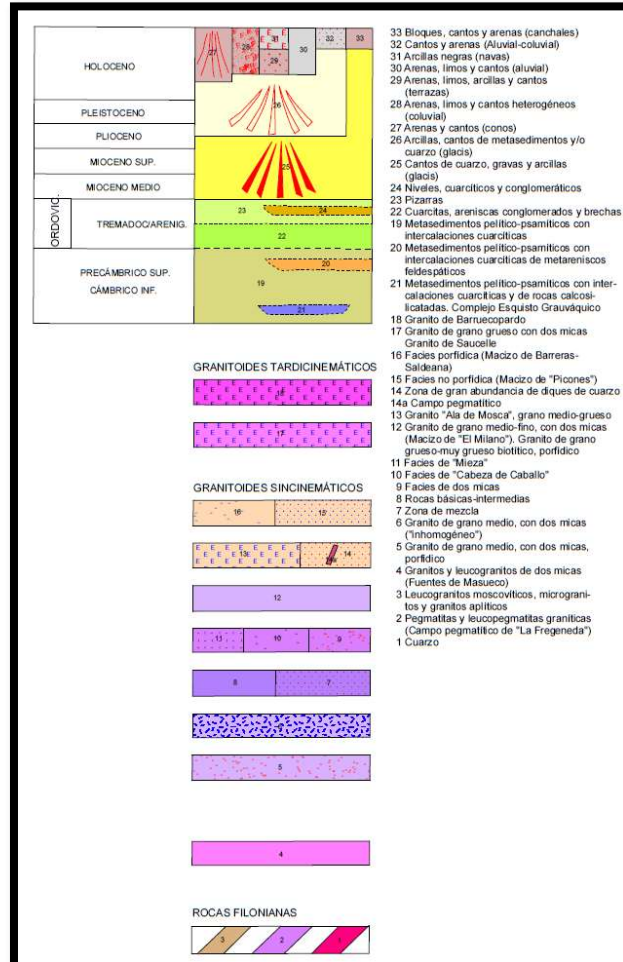


Figura 4.3: Litología de la zona de estudio (Cartografía del Instituto Geológico y Minero de España, s.f.).

4.3 CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO DE BARRUECOPARDO

Este es el macizo que alberga nuestra zona de estudio. En él, el granito aflora en lajas a ras de suelo o en bolos redondeados, dando pequeños berrocales. Presenta carácter intrusivo sobre todos los materiales que le rodean, ya sean metasedimentos u otros macizos graníticos (Macizo de Mieza, Milano, Río Huebra y granito de dos micas inhomogéneo). En el Macizo de Mieza es frecuente observar diques de este granito que cortan a la foliación. A su vez dentro del macizo se pueden observar enclaves del granito de Mieza, que se encuentran rotados. El Macizo de Barruecopardo no presenta ningún tipo de orientación o foliación mineral. Martínez Fernández (1974 b) incluye a este granito en el grupo II, dentro de la facies de grano grueso y medio.



El macizo está constituido por un granito-leucogranito de dos micas, de grano medio a medio-grueso, no porfídico. Tiene textura equigranular, con el cuarzo de 2-4 mm. El feldespato se encuentra en la matriz, u ocasionalmente formando fenocristales de 10-20mm. La biotita tiene tamaños de 2-4 mm al igual que la moscovita, y esta última presenta secciones romboidales (2-3 mm) o forma grandes placas xenomorfas que suelen formar orlas o estar intercrecida con la biotita.

Los enclaves que presentan pueden ser del encajante, biotíticos, de rocas intermedias (existentes sólo en la parte norte en donde está en contacto con ellas) y del granito porfídico de Mieza, siendo frecuente encontrar estos enclaves que pueden alcanzar un tamaño considerable en la mitad norte del macizo.

Los diques que se encuentran son de aplita, pegmatita y de cuarzo ("sierros"). Estos últimos son los más importantes, se emplazan a favor de fracturas con dirección NE y determinan resaltes topográficos, como por ejemplo el "sierro" que aflora al oeste del macizo, en los resaltes de Entramboslomos, Homomula y Peñahorcada.

Las fracturas que presenta el granito tienen direcciones más comunes de NE, N70°E a E-O, encontrándose otras de menor importancia según N125°E, a favor de las que se producen turmalinizaciones.

Petrograficamente este granito presenta una textura holocristalina, inequigranular de grano medio, algo porfídica. Los principales constituyentes mineralógicos son cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa (albita), biotita y moscovita. Como accesorios más frecuentes se encuentran, opacos, circón, apatito, cordierita, silimanita (agujas y fibrolita), epidota y clinozoisita. Por último, los minerales secundarios o de cristalización tardía son, sericita, moscovita, clorita, rutilo (granular, sagenítico), fibrolita y feldespato potásico.

El cuarzo se presenta en cristales individuales o en agregados de hábito xenomorfo. Cuando lo hace en agregados, suele presentar formas globosas, siendo los cristales anhedrales. Tiene extinción ondulante y a veces fenómenos de poligonización, dando lugar a la formación de subgranos, lo que indica la existencia de una deformación y recrystalización.

El cuarzo presenta inclusiones de finas agujas de rutilo, circón, moscovita, biotita, opacos, apatito, plagioclasa y feldespato potásico.

Otros tipos de cuarzo que se pueden diferenciar son:

- a) Cuarzo asociado a moscovitas histerógenas-tardías: que suele formar crecimientos simplectíticos en los bordes de aquellas.
- b) Cuarzo de mirmequitas: desarrolladas en los cristales de plagioclasa que están en contacto con feldespatos potásicos (cuarzo vernicular).
- c) Cuarzo goticular: de forma redondeada incluido en el feldespato potásico.



Estudio comparativo del método de tuneladora vs explosivos para rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)



d) Cuarzo intergranular.

El feldespato potásico se presenta como cristales o agregados policristalinos de hábito anhedral y muy raramente como fenocristales subhedrales de aproximadamente 10-15 mm; a veces presenta carácter intersticial. Está maclado según la ley de Carlsbad y de la microclina, y presentan texturas peritéticas del tipo “film”, “vein” y “patch”.

El feldespato potásico presenta inclusiones de cuarzo, biotita, moscovita, plagioclasa, apatito, y circon. Las plagioclasas incluidas a veces son idiomorfas y con el núcleo alterado.

Los escasos fenocristales de feldespato potásico de 10-15 mm, presentan con gran frecuencia texturas peritéticas.

En estas rocas es poco frecuente el reemplazamiento de la plagioclasa por feldespato potásico. En cambio se suelen observar bordes de corrosión entre ambos minerales.

Otro tipo de feldespato potásico, de origen secundario, que es muy escaso, es el que procede de la cloritización de la biotita.

La plagioclasa se encuentra como cristales aislados o en agregados de 2-3 cristales, de hábito anhedral, o a veces subhedral. Presenta la macla de la albita, y tiene un contenido en anortita de 0-10%, siendo normalmente albita.

Presenta alteración a sericita y moscovita. Tiene inclusiones de cuarzo, moscovita, biotita y apatito.

A veces, entre los cristales de feldespato potásico se desarrolla una albita intergranular. Hay también plagioclasas de hábito subidiomorfo que están como inclusiones en el feldespato potásico y que suelen tener el núcleo sericitizado.

Por último, se puede diferenciar una albita tardía, relacionada con los procesos de peritización.

En algunos cristales de plagioclasa se han observado pequeños cristales de epidota y clinozoisita.

La biotita se encuentra generalmente en cristales aislados, más raramente en agregados de 2-4 individuos, de hábito anhedral, a veces subhedral, presentando un fuerte pleocroismo que varía de marrón rojizo o castaño muy oscuro (Ng, Nm) a amarillo claro (Np).

Presenta inclusiones de opacos, circón, y apatitos. Es muy frecuente observar halos pleocróicos en las biotitas, producidos por los circones o por otros minerales radiactivos no identificados.

El proceso de cloritización en las biotitas es poco importante, aunque varía en intensidad, encontrándose como subproductos rutilo sagénico y feldespato potásico



secundario. Otro proceso de alteración que sufre la biotita es la moscovitización, mediante el cual se produce una sustitución parcial, o total de la biotita. La moscovita crece en continuidad óptica, observándose restos de biotita, así como sus inclusiones.

La moscovita se encuentra en una proporción igual o menor, que la de la biotita. Tiene un tamaño muy variable, aunque se encuentran grandes cristales de moscovita. Presenta un hábito anhedral o subhedral.

Se pueden diferenciar varios tipos de moscovita, según los minerales a los que esté asociada, siendo toda ella de carácter tardío:

- a) Moscovita asociada a feldespato (potásico y plagioclasas).
- b) Moscovita asociada a biotita.
- c) Moscovita asociada a sillimanita. Estas moscovitas presentan pequeños restos de sillimanita en forma de pequeños prismas finos.

Estas moscovitas por lo general suelen desarrollar en los bordes crecimientos simplectíticos con cuarzo. Como inclusiones presenta cuarzo, apatito, circón, sillimanita, y opacos.

Como minerales accesorios más característicos se encuentran, la cordierita, que se presenta en cristales de hábito subhedral o anhedral que están parcial o totalmente alterados a sericita. Sillimanita, que siempre se encuentra dentro de la moscovita, ya sea en pequeños cristales aciculares o bien en cristales de mayor tamaño de forma redondeada y con inclusiones de circones. El circón se presenta como inclusiones de todos los minerales, en la biotita siempre produce halos pleocróicos.

En dos muestras, se han observado dentro de las plagioclasas pequeños cristales de epidota y clinozoisita.

Además de los enclaves anteriormente mencionados, se han encontrado en este macizo, enclaves de un granito de dos micas, porfídico, con mesostasis de grano medio-grueso asimilables al granito de Aldeadávila de la Ribera.

Tanto a escala de afloramiento como microscopía, en estos enclaves pueden distinguirse texturas deformativas, producidas por la cizalla dúctil que afectó al macizo al que pertenecen. Estas texturas quedan definidas por una reducción del tamaño de grano, cuarzoes alargados-sigmoidales, flocristales de feldespato potásico rotados, con sombras de presión, y micas orientadas rodeando al feldespato potásico que marcan una determinada foliación.

La textura general, es holocristalina, heterogranular de grano medio a grueso, porfídica y deformativa orientada. Los minerales principales son cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, biotita y moscovita. Dentro de los minerales accesorios encontramos opacos, apatito, circón, y turmalina. Como minerales de cristalización tardía y/o



Estudio comparativo del método de tuneladora vs explosivos para rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)



secundarios se observan, clorita, feldespatos potásico, rutilo saenítico, esfena, sericita, moscovita y fluorita.

En general, estos granitos presentan altos valores de cuarzo y corindón, el último de los cuales corresponde con la abundancia modal de moscovita. Los contenidos en calcio, hierro, magnesio y titanio son bajos (bajas proporciones de plagioclasa cálcica y ferromagnesianos), mientras que el fósforo (apatito normativo) es más alto que en otros tipos de granitos, generalmente con menor I.D., aunque siempre muy inferior al de las rocas básicas e intermedias. Todas estas características evidencian que la mayoría de las rocas incluidas en este macizo corresponden a granitos bastante diferenciados. Se clasifican como monzogranitos según el diagrama QAPF y en él, se puede observar como una de las muestras proyectadas se aleja de las composiciones modales del resto, mostrando un carácter mucho más básico. Esto es debido a que la muestra procede de un enclave de tipo biotítico incluido en este granito.

Esta diferencia composicional también se advierte en el diagrama de Bouseil y Sokkary (1975). La muestra con mayor contenido biotítico y correspondiente al enclave presenta unos valores más altos en Ba y SR que el resto y así un grado de diferenciación menor.

En cuanto a su interpretación tectónica el granito de Barruecopardo es considerado de tipo colisional tardicinemático. De hecho, no se ha observado a escala de campo ningún tipo de orientación o foliación mineral.

4.3.1 Geotecnia del macizo rocoso

En este apartado se calcularán las características geotécnicas del macizo rocoso. Dichas características pueden evaluarse en base a distintas teorías desde las que llamadas Teorías clásicas, hasta los métodos actuales, que se agruparan bajo la denominación de Teorías modernas.

Como punto de partida de estas teorías se deberán de tener en cuenta datos de la roca estructural, así como de elementos añadidos artificialmente a la misma. Estos han de considerarse en proyecto de túneles. Pudiendo partir de esta idea se encuentran dos casos ideales extremos:

- La roca sana, que se aproxima a un material isótropo y homogéneo capaz de autosostenimiento.
- El suelo no cohesivo, sin capacidad para sostenerse por sí sólo.

En el caso de la roca sana, el túnel no necesita refuerzos estructurales, dado que el propio terreno posee una estructura resistente suficiente.

Por el contrario, la estructura añadida por el proyectista es el único elemento resistente capaz de soportar las cargas, cuando el suelo no es cohesivo. Este tipo de suelos no son capaces de desarrollar una carga estructural que sea capaz de soportar su peso.



La mayoría de los casos reales son un compendio entre los dos ejemplos anteriores. Por ello, actualmente se consideran soluciones en las que se considera tanto al terreno como a los elementos de sostenimiento, como el elemento estructural resistente del proyecto (López Jimeno, 2011)^[14].

4.3.1.1 Teorías Clásicas de Cálculo y dimensionamiento

Se consideran aquí las primeras concepciones de estructuras resistentes en las que no se cuenta con colaboración alguna de la roca. De acuerdo con esta definición, podrían quedar comprendidos, en primer lugar, los dimensionamientos pragmáticos que hacían los maestros del arte de las obras subterráneas hasta la última mitad del Siglo XIX (y, en algunos países, incluso hasta los primeros años del Siglo XX) (López Jimeno, 2011)^[14].

Un segundo grupo lo forman las proposiciones de leyes de carga derivadas de la observación real de los volúmenes de los hundimientos), que aparecen a partir de mediados del siglo XIX. Estas observaciones se hicieron en diversos túneles en rocas de baja calidad.

El último grupo lo constituyen las posteriores formulaciones más concretas, que se han venido empleando hasta la década de los años 1970-1980. De entre ellas fueron muy utilizadas las hipótesis de carga de Terzaghi (1945-1946) primero, las de Protodyakonov (1952) y otros después.

Todas ellas suelen llamarse Teorías Clásicas, en todas ellas se proponen leyes de carga para las bóvedas de desprendimiento. A partir de las cuales, se dimensionan las estructuras de sostenimiento, sin contar para nada con la colaboración del terreno (López Jimeno, 2011)^[14].

4.3.1.2 Teorías modernas

El avance que se ha experimentado desde finales de los 60, ha supuesto la aplicación de la Geotecnia a los túneles, lo que ha permitido mantener hoy en día planteamientos formalmente análogos a los de las llamadas Teorías clásicas. Las leyes de carga podrían tener, por una parte, unos parámetros para identificar familias de macizos de características globales análogas y, por otra, unos coeficientes, a calibrar de acuerdo con el estado real de alteración que, en cada familia. Pues bien, es tal y tan errática la dispersión de tales coeficientes y parámetros que este camino no es viable y las nuevas teorías se orientaron de forma diferente (López Jimeno, 2011)^[14].

Partiendo de que el macizo atravesado puede formar parte de un elemento estructural (lo que ha quedado evidenciado por la moderna Mecánica de rocas) es posible, aunque con una aproximación grosera, su caracterización geomecánica.

A partir de esta premisa, se han establecido una serie de Métodos de cálculo y dimensionamiento, con soportes de muy diversa naturaleza:



Estudio comparativo del método de tuneladora vs explosivos para rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)



- Métodos empíricos

Cualquiera de ellos parte de una u otra Clasificación Geomecánica de rocas, desde las cuales se llega a estimaciones de las cargas sobre los sostenimientos. Pudiendo citar como más famosas: Terzaghi (1945-46); Lauffer (1958-59), o las más empleadas hoy en día, Bieniawski y Barton (López Jimeno, 2011)^[14].

- Métodos analíticos

Parten de la hipótesis de comportamiento elástico del macizo, hasta llegar a una cierta deformación, en que se produce la plastificación.

Se acepta que hay una correspondencia entre presión interna y deformación radial (algunos la llaman convergencia), según una curva, la curva característica de la cavidad, que es del tipo $p_i = f_n(\delta_i)$.

Por otra parte, el sostenimiento elegido debe ser capaz de resistir una presión igual a dicha presión interna p_i .

Como la ley de presiones/deformaciones del sostenimiento se conoce (curva característica del sostenimiento), junto con la curva característica de la cavidad, define la situación de equilibrio esperable como la zona de intersección de ambas gráficas.

Se comprende que si la deformación (convergencia no es aceptable), se puede elegir otra curva de sostenimiento, lo que nos permite elegir un dimensionamiento adecuado (López Jimeno, 2011).

- Métodos numéricos

Se parte de una ordenación de los elementos constitutivos del macizo que se asignan a una modelización según mallas de elementos finitos, en el caso más sencillo y frecuente, o bien a una malla de elementos discretos o discontinuos (López Jimeno, 2011)^[14].

En el caso de elementos finitos, se puede señalar:

- ❖ El método permite analizar el estado tensional de cada fase o etapa del proceso constructivo.
- ❖ Las mallas suelen ser más densas en las proximidades del entorno de la cavidad, por ser la zona que interesa analizar con el mayor detalle.

- Métodos empíricos

La dificultad por tanto reside en el hecho de que cada macizo requiere establecer su propia clasificación geomecánica. Se puede partir de una clasificación típica, pero es necesario adaptarla al caso de estudio (López Jimeno, 2011)^[14].



- Métodos analíticos

Estos métodos son, en principio, muy sugestivos, por usar las leyes de la Elasticidad, lo que facilita el dimensionamiento.

El éxito logrado en bastantes casos llevó a los expertos que los promovieron a abandonar los Métodos empíricos. Pronto se vio, sin embargo, que lo que pareció de posible generalización, lo era solamente en casos de macizos de características muy similares (López Jimeno, 2011)^[14].

- Métodos numéricos

La atracción inicial que producen estos métodos se basa en que los modelos matemáticos parecen capaces de adaptarse con gran facilidad a las condiciones cambiantes de los macizos.

Además, como ya se ha comentado, su gran capacidad de cálculo permite abordar estudios paramétricos con un amplísimo rango de variaciones. Pese a esta realidad, si la calidad de los parámetros geotécnicos conocidos es precaria, esa enorme envolvente de posibles situaciones tiene un mero valor teórico, que es, desgraciadamente, lo más frecuente (López Jimeno, 2011)^[14].

4.3.1.3 Características resistentes del macizo de Barruecopardo

En este caso los cálculos llevados a cabo para la caracterización del macizo de Barruecopardo, se han realizado por la teoría moderna de Bieniawski (RMR) (Bieniawski, 1989)^[1], para la cual se necesitan conocer algunas características previas del macizo en cuestión. Estos datos necesarios se tomarán a partir de estaciones geotécnicas en el macizo.

Esta teoría consiste en un criterio de puntuaciones con el que se obtiene el índice RMR. Estas puntuaciones se fundamentan en características del macizo como pueden ser: Resistencia de la roca, RQD, separación de las diaclasas, estado de las discontinuidades o agua freática.

Estos datos mencionados anteriormente se compararán y clasificarán en base a las tablas postuladas por Bieniawski, dando por cada clasificación un determinado número de puntos (López Jimeno, 2011)^[14].



Estudio comparativo del método de tuneladora vs explosivos para rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)

Tabla 4.3: Caracterización geomecánica del suelo (Bieniawski, 1989)^[1].

1	Resistencia de la roca sana	Ensayo de carga puntual (MPa)	> 10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	En valores bajos, ensayos a compresión simple (MPa)		
		Compresión simple (MPa)	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 - 1	< 1
	Valoración		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	< 25		
	Valoración		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas (m)		> 2	2 - 0,6	0,6 - 0,2	0,2 - 0,06	< 0,06		
	Valoración		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0,1 mm	0,1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando < 5 mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente Alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel (l/min)	Nulo	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		Ratio Presión de agua	0	0 - 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo		
	Valoración		15	10	7	4	0		

En el caso del macizo de estudio se han tomado como datos los siguientes:

- Resistencia en ensayo a compresión simple: 181,7 MPa.
- RQD: 95%



- Separación de diaclasas superior a los 2 metros.

El macizo no presenta diaclasado, presenta una rugosidad elevada, tratándose de un macizo completamente sano y sin goteo. Por lo que se obtienen los siguientes puntos según la clasificación RMR (Bieniawski, 1989)^[1]:

Tabla 4.4: Puntuaciones obtenidas.

Compresión simple (MPa)		12
RQD (%)		20
Separación entre diaclasas (m)		20
Estado de las discontinuidades	Longitud	6
	Abertura	6
	Rugosidad	6
	Relleno	6
	Alteración	6
Agua freática		15
	Total	97

Esta puntuación según la clasificación RMR nos da como resultado, que el macizo rocoso objeto de estudio presenta unas características “Muy buenas” lo que favorece la construcción de estructuras de larga duración sin sostenimiento. Clasificando por tanto como “Clase I” al macizo rocoso (López Jimeno, 2011)^[14].

Tabla 4.5: Criterio del macizo en base al RMR (Bieniawski, 1989)^[1].

RMR	Clase	Calidad	Cohesión (MPa)	Angulo de rozamiento (°)
81 - 100	I	Muy buena	> 0,4	> 45
61 - 80	II	Buena	0,3 - 0,4	35 - 45
41 - 60	III	Media	0,2 - 0,3	25 - 35
21 - 40	IV	Mala	0,1 - 0,2	15 - 25
0 - 20	V	Muy mala	< 0,1	< 15

Esta puntuación no se ha visto aminorada debido a la presencia de buzamiento, puesto que se trata de un yacimiento masivo de granito en el cual se sitúa nuestra galería, en el que aparecen capas de un granito enriquecido con minerales de wolframio (SIEMCALSA, 2018)^[25]. En el caso de que el yacimiento hubiese presentado otras características geológicas, se debería haber corregido la puntuación con las tablas siguientes:



Estudio comparativo del método de tuneladora vs explosivos para rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)



Tabla 4.6: Corrección por dirección y buzamiento (López Jimeno, 2011)^[14].

Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Tipología de obra	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Tabla 4.7: Corrección por ángulo de buzamiento (López Jimeno, 2011)^[14].

Dirección de las diaclasas perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al eje del túnel		Buzamiento 0 - 20º cualquier dirección
Excavación con buzamiento		Excavación contra buzamiento				
Buzamiento 45 - 90º	Buzamiento 20 - 45º	Buzamiento 45 - 90º	Buzamiento 20 - 45º	Buzamiento 45 - 90º	Buzamiento 20 - 45º	
Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy desfavorable	Media	Desfavorable

Por tanto, dada la buena calidad del macizo de Barruecopardo no será necesario ningún tipo de sostenimiento. Por ello se puede afirmar que es un terreno con la suficiente resistencia a las deformaciones producidas por la excavación de la galería.

4.4 CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS

La zona de estudio se encuentra enclavada en materiales considerados tradicionalmente como impermeables o de baja permeabilidad, fundamentalmente granitos, aunque también aparecen materiales metasedimentarios como pizarras o esquistos, y en menor medida cuarcitas (Junta de Castilla y León, s.f.)^[10].

Las diferentes formaciones que pueden tener cierto comportamiento acuífero dentro de la zona son:

- Cuaternario:

Se han diferenciado en aluviales y depósitos de laderas, ambos presentan un interés prácticamente nulo a causa de su escasa entidad.

- Lehm granítico y alteraciones en los metasedimentos.

Puesto que sus espesores no son significativos, su interés hidrogeológico es escaso. Los puntos de agua relacionados se reducen a pequeños manantiales de carácter estacional o a pozos de excavación manual.



- Paleozoico, Precámbrico y rocas ígneas.

Estos materiales presentan permeabilidades de bajas a muy bajas. Los principales manantiales relacionados con ellos están asociados a fracturas de carácter regional y aportan caudales máximos de 1 L/s.

Tanto en granitos como en metasedimentos se han perforado varios sondeos con el objeto de cubrir las demandas de los núcleos de población existentes. Los resultados han sido muy diversos, proporcionando en algunos casos caudales de 3-4 L/s.

Existe una excepción en la zona, correspondiente al sondeo N.º 091880001 de 300 m de profundidad que se realizó a principios de los años ochenta sobre una pegmatita del Complejo Esquisto-Grauváquico. Dicho sondeo es surgente con un caudal de 20 L/s continuos y sus aguas presentan fuerte mineralización y carácter termal (Litoteca de sondeos del Instituto Geológico y Minero de España, s.f.)^[12].

En relación con el quimismo de las aguas subterráneas, se han analizado trece muestras, recogidas en los puntos que a priori, presentan mayor interés desde el punto de vista hidrogeológico. Nueve de las muestras analizadas presentan facies bicarbonatadas-calcicas, dos bicarbonatadas-sodicas, una clorurada sódica y una clorurada cálcica. Las conductividades oscilan entre los 60 y 982 $\mu\text{S}/\text{cm}$, apareciendo las menores en los manantiales relacionados en su mayoría con fracturas de dirección Noreste y las mayores en los sondeos por captar estas aguas con mayor tiempo de resistencia en la roca.

4.5 HIDROGEOLOGÍA SUPERFICIAL

En la zona de estudio, encontramos el río Duero cruzando de Norte a Suroeste recibiendo en su margen izquierda a los ríos Huebra y Agueda como principales afluentes. El Duero, en este tramo y a causa del brusco cambio de altitud debido al escalón occidental de la meseta, aparece muy encajado, formando zonas de “Arribes” o rápidos, hoy aprovechados para la producción de energía en la frontera con Portugal.

No existen estaciones de aforo debido a que el cauce del Duero se encuentra regulado por el embalse de Saucelle. En el río Huebra, y cercano a la zona de estudio, existe una estación de aforo denominada EA-94.

El embalse de Saucelle es la única obra de regulación de caudal existente, con un volumen de embalse de 169 Hm³, y una capacidad de producción eléctrica de 285 MW.

No se controla la calidad de las aguas superficiales en ningún punto de la zona, pero según el Plan Hidrológico (1988) y los informes revisados, las aguas del Duero en esta zona, pueden clasificarse como de calidad general del agua (ICG) entre 70 y 80.



Estudio comparativo del método de tuneladora vs explosivos para rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)



Respecto al riesgo potencial de inundación, los márgenes del Duero se consideran como zona de rango de prioridad intermedia, mientras que los márgenes del Huebra son considerados de prioridad baja. Las zonas situadas inmediatamente aguas abajo de los embalses se han definido como zonas de riesgo potencial, precisamente por esa localización (Instituto Geológico y Minero de España, s.f.)^[8].

4.6 MEDIO AMBIENTE

El clima existente en el ámbito objeto de estudio se encuentra comprendido entre las isoyetas de 700 y 800 mm, incrementándose las precipitaciones en dirección Este-Oeste, con variaciones locales en función de la altitud.

Las precipitaciones, dentro de la Cuenca del Duero, se caracterizan por su irregularidad en cuanto a su distribución temporal y por la desigualdad en cuanto a su distribución espacial, y se originan en su mayoría durante la primavera y el otoño. La estación más seca es siempre el verano, con valores comprendidos entre los 40 y 75 mm y una enorme variabilidad interanual.

El rasgo climático más característico de la cuenca es la intensidad y duración de los inviernos con veranos cortos y relativamente frescos.

Las temperaturas medias aumentan rápidamente de Este a Oeste desde algo más de 11°C hasta los 16°C, a causa del rápido descenso de altitud que se produce en esta dirección.

Los valores de evapotranspiración potencial (E1TP) en media anual, están comprendidos entre 750 y 850 mm incrementándose hacia el Noroeste.

Según la clasificación agroclimática incluida en el PIAS, (Instituto Geológico y Minero de España, s.f.), en el área que comprende la zona de estudio, predomina el clima mediterráneo continental semicálido que, por el régimen de humedad puede denominarse seco, aproximadamente en la mitad oriental de la zona de estudio y húmedo en la mitad occidental.



5. MÉTODO DE COMPARATIVA DE LOS MÉTODOS EN ESTUDIO

5.1 METODOLOGÍA

La comparativa se realizará clasificando diversos aspectos o características de proyecto que sean diferenciables entre la metodología tradicional de perforación y voladura o el uso de tuneladora (TBM). Estas características se valorarán desde el punto de vista, técnico, económico y de la higiene y salud de los trabajadores; de modo que la valoración se realizará de forma numérica. Aquellas características que no sean idóneas o no recomendables se les asignará un valor numérico de 0, mientras que a las características óptimas se les otorgarán 10 puntos.

Las características que se van a valorar son las siguientes:

- Trazado
- Afección al terreno
- Tiempo de ejecución
- Coste de operación
- Seguridad
- Ventilación
- Rendimiento

5.1 TRAZADO

El trazado plantea una de las grandes diferencias entre ambas metodologías. Por un lado, disponemos de la flexibilidad de giros y de inclinación que nos ofrece el avance por el método tradicional de perforación y voladura, lo que nos permitiría la construcción de un trazado completamente optimizado para las labores que se deseen realizar, además de permitir seleccionar un tipo de sección elegida en gabinete.

En el caso de las TBM presentan grandes restricciones en cuanto a lo que a cambios de dirección e inclinación se refieren, dado que se tratan de grandes máquinas, que necesitan de amplios radios para su correcto funcionamiento, siendo de 500 metros el radio mínimo deseable. La inclinación máxima de 3,5-4%. Esto es un factor altamente restrictivo a la hora de plantear un trabajo de este tipo en el ámbito minero donde se presentan gran cantidad de giros y quiebros en el desarrollo de una mina subterránea (Plano N.º1 y N.º 6).

También hay que destacar que el uso de esta metodología no permite otro tipo de sección que no sea circular, debido a la forma de avance de la maquinaria TBM.

Trazado	
Perforación y voladura	10
Tuneladora	5



5.2 AFECCIÓN AL TERRENO

La afección al terreno es una característica importante en aquellos macizos rocosos en los que la capacidad portante del terreno sea baja. En el caso tratado, un macizo sano de granito, la afección de ambas metodologías sería baja. Pero se tomará en consideración.

En el caso del método de avance tradicional la afección al terreno será mayor que en el caso de las tuneladoras. Este último es el ideal para terrenos no competentes debido a la gran estabilidad que ofrece su sección circular, así como la posibilidad de simultanear los trabajos de avance con los de colocación de sostenimiento. Este sostenimiento limitará a la perforación y voladura en el sentido de que para mejorar la seguridad se deberán de recurrir a avances por voladura menores. El sostenimiento es el último elemento del ciclo de perforación y voladura.

Afección al terreno

Perforación y voladura	6
Tuneladora	10

5.3 TIEMPO DE EJECUCIÓN

Los tiempos de ejecución de ambas metodologías son completamente diferentes. Por un lado, tenemos las TBM que son máquinas de funcionamiento continuo que, según los datos de bibliografía técnica, se pueden estimar unos avances medios de 30 - 45 m/día. Mientras, el método tradicional presenta una ejecución cíclica dividida en etapas y que posee unos avances medios de 7 - 8 m/día. Estos datos nos darán una idea del tiempo que llevará el desarrollo completo de la rampa de acceso, el cual en el caso de la tuneladora se verá incrementado por el tiempo de preparación de la plataforma para el montaje, el montaje de esta y el desmontaje final.

Tiempo de ejecución

Perforación y voladura	10
Tuneladora	6



5.4 COSTES DE OPERACIÓN

Los costes se deberán valorar a nivel global del proyecto, dado que los costes de operación de una tuneladora son mayores cuanto más corto es el trazado a desarrollar debido al coste de esta maquinaria. Sin embargo, una vez puesta en operación su coste de operación es inferior al de perforación y voladura. Puesto que el desarrollo interno de la mina deberemos de hacerlo mediante perforación y voladura el coste de adquisición de maquinaria para la perforación (Jumbo) se podría llegar a considerarlo de forma global, solo considerándose el uso de fungibles necesarios para el desarrollo de la rampa de acceso como coste.

Coste operacional	
Perforación y voladura	10
Tuneladora	8

5.5 SEGURIDAD

La seguridad es considerablemente mayor en el caso de la tuneladora, dado que este sistema de avance como ya se ha mencionado permite simultanear la colocación de sostenimiento con las labores de avance, en el caso de los escudos. En casos de roca dura, los trabajadores trabajarían aún menos expuestos que en el método tradicional, ya que estos se verían protegidos por la estructura de la máquina y por las características resistentes de la sección de este tipo de máquinas. Además, la perforación y voladura siempre presenta el riesgo asociado a la utilización de explosivos y su manipulación.

Seguridad	
Perforación y voladura	5
Tuneladora	10

5.6 VENTILACIÓN

La ventilación está ampliamente relacionada con la seguridad e higiene de los trabajadores, los cuales deben de trabajar en unas condiciones adecuadas dependiendo del tipo de ventilación empleada y del tipo de avance. En el caso de la tuneladora, el aire irá destinado a rebajar la temperatura del área de trabajo, mitigación del polvo en la zona y respiración de los trabajadores. En el caso de la perforación y voladura se sitúa como problema principal la dilución del tapón de gases proveniente de las voladuras de avance.

Ventilación	
Perforación y voladura	6
Tuneladora	10



Estudio comparativo del método de tuneladora vs explosivos para rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)



5.7 RENDIMIENTO

El rendimiento de avance una vez se ha comenzado la ejecución de la obra es mayor en el caso de la tuneladora como se ha visto en apartados anteriores. Este tipo de maquinaria tiene unos avances diarios 4 veces superiores a los obtenidos con el método tradicional. Lo que las hace ideales en obras de gran longitud en las se equilibren los tiempos de preparación y montaje.

Rendimiento	
Perforación y voladura	6
Tuneladora	10



6. PROPUESTAS A ANALIZAR Y DETERMINACIÓN DEL TRAZADO

El trazado propuesto toma como base el modelo de yacimiento a partir del cual se fija el futuro sistema de explotación con el fin de elegir la alternativa de trazado que mejor se adapte a la estructura. En este caso se va a realizar una explotación por subniveles. Adecuado en yacimientos regulares, con rocas y mineralización resistentes (mínimo 55 MPa), potentes (>7m), cayendo el material al hueco abierto. Las distancias entre niveles de 60/100/130 metros entre niveles y 30 entre subniveles, dependiendo de la dilución admisible y el coste de operación (Castillo Anyosa, 2015)^[4].

El sistema que se empleará en esta explotación se realizará con 60 metros entre niveles, conocida esta característica de explotación se podrá comenzar el diseño de la galería de acceso.

- **Diseño del trazado en planta**

La rampa de acceso contará con una forma en espiral constituida cada ciclo por dos curvas con radios de 50 metros y dos secciones rectas de 300 metros. Dicha rampa se proyectará paralela a la dirección de la mineralización, de tal modo que las galerías de transporte y transversales que dan acceso a los tajos sean perpendiculares a la dirección de la mineralización (Plano N.º 6).

- **Diseño del trazado en alzado**

La rampa de acceso tendrá una pendiente media del 10% (RGNBSM, 2005)^[21], con el fin de facilitar el acarreo y la seguridad en las labores de transporte. Esta medida junto con la distancia entre los niveles de explotación define los tramos de longitud recta de 300 metros. Lo que permite la ejecución de un menor número de giros durante el trayecto y que las curvas carezcan de pendiente.

Como se ha mencionado anteriormente se realizarán curvas con una diferencia de altura de 60 metros. Es desde estas curvas desde donde se acometerán las galerías de los distintos niveles. El sentido de la espiral formada por la rampa se debe a la mejor transición posible entre galerías, evitando giros cerrados de la maquinaria (Plano N.º 6).

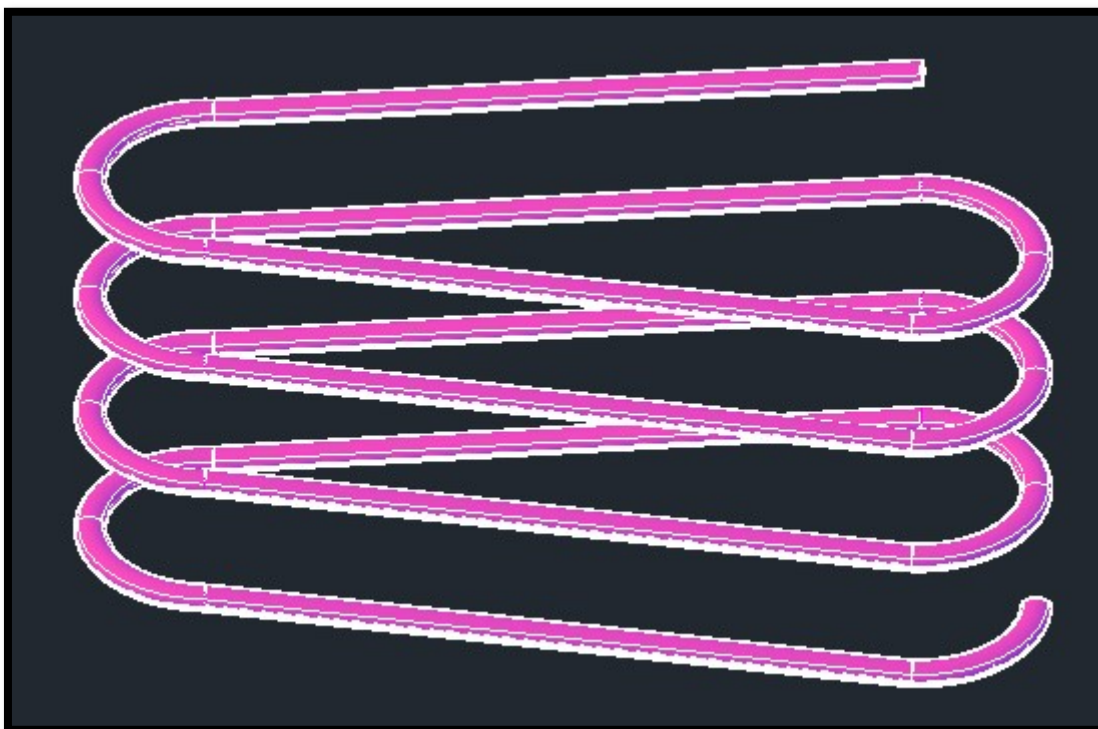


Figura 6.1: Modelo 3D de la rampa de acceso.

- **Sección del trazado**

El estudio cuenta con dos tipos de secciones, dependiendo del método de avances, pudiendo ser a sección completa mediante la ejecución con tuneladora o sección tradicional para el método de perforación y voladura. En ambos casos la sección está limitada por las dimensiones del vehículo de mayor tamaño que vaya a transitar por ellas. En este diseño se ha estimado que dicho vehículo es el camión de perfil bajo Caterpillar AD45B (Caterpillar, 2018)^[5], que según las recomendaciones de la propia marca requiere de 4.5 x 4.5 metros para su acarreo habitual. En el que la galería va a contar con doble carril, ampliamos el ancho de galería hasta los 10 metros más la ejecución de una cuneta lateral. Dicha cuneta está compuesta por un tubo perforado en su parte superior y se encuentra apoyada por un bombeo transversal del 2%, para la recolección del agua filtradas en la cuneta. Las arquetas de recolección se situarán cada 150 metros, que conducirán todas las aguas de la mina al punto de menor cota. En este punto se montará un sistema de bombeo con el fin de evacuar todas las aguas infiltradas o de operación.

La sección contará con todos los suministros necesarios para las labores de ejecución y explotación de la galería. En el lado izquierdo de la galería se situarán las conducciones de electricidad, agua y aire a presión. Mientras que en el lado contrario y en una zona elevada se encontrará la manga de ventilación, a fin de evitar accidentes con la



maquinaria. Esta manga tendrá un diámetro de acorde a las medidas ofrecidas por Epiroc (Epiroc, 2019)^[6] y que será calculado en apartados posteriores. Esta manga de ventilación se colocará en el lado interno a fin de reducir las pérdidas en el retorno. Esta sección se puede ver en el Plano N°4.

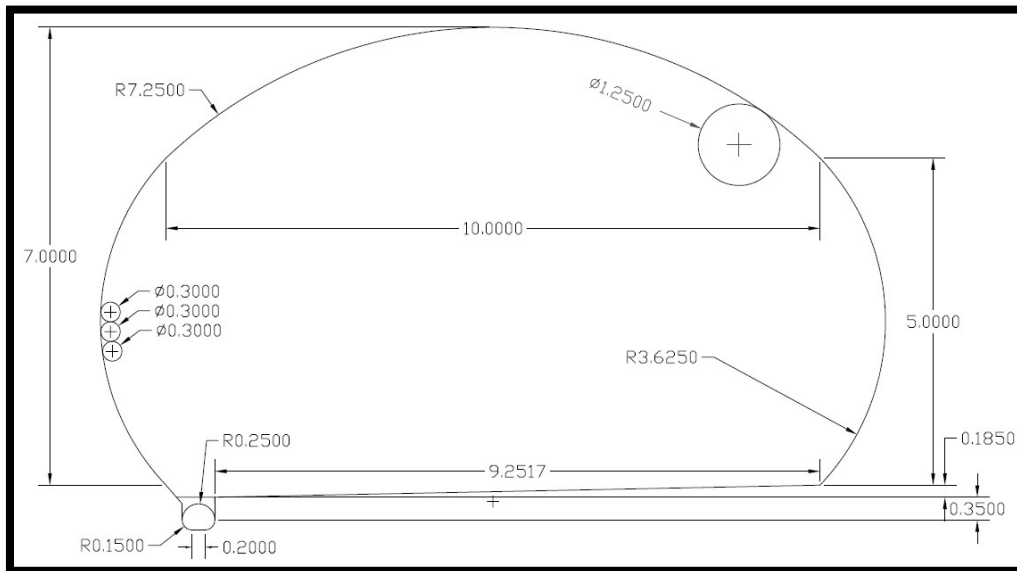


Figura 6.2: Sección de la rampa de acceso.

6.1. ANÁLISIS DE LA COMPARATIVA

Cada una de las propuestas como se ha visto en la metodología tiene ventajas y desventajas, ahora se van a poner en común todas las situaciones con el fin de determinar la solución más adecuada para este yacimiento.

La tuneladora presenta tiempos de ejecución bajos, pero en cambio presenta grandes inconvenientes. El elevado precio de la máquina, más los tiempos de preparación y montaje en la boca de la galería, hacen que estos buenos resultados de avance se vean ensombrecidos en la ejecución de galerías de poco desarrollo. Estos inconvenientes sumados a la imposibilidad de realizar giros cerrados y sus bajas pendientes obligarán a un desarrollo lineal muy superior, lo que acarrearía unos gastos en ventilación superiores, así como gastos administrativos, puesto que cabe la posibilidad de que fueran necesarias un mayor número de cuadrículas mineras.

La perforación y voladura presenta como inconvenientes la seguridad debido al empleo de explosivos y su bajo rendimiento diario debido a que se trata de un método cíclico. Entre sus principales ventajas, destaca su flexibilidad en cuanto a trazado y sección se refiere, lo que nos permitirá la realización de giros cerrados y pendientes más apropiados para este tipo de obra. Además de permitir el empleo de la misma maquinaria para realizar los futuros desarrollos de mina.



6.2. RESULTADOS

La mina se encuentra en un macizo competente en el que el sostenimiento no supone un inconveniente, y donde la flexibilidad de operación es importante en el desarrollo de las nuevas galerías de producción que se desarrollaran a partir de la rampa de acceso. Además, se tienen en cuenta las diferencias longitudinales de la galería que supondría el empleo de ambos métodos.

Estos motivos plantean por tanto el método de perforación y voladura como el idóneo. Debido a que este tipo de sistema supone una única inversión en equipos, dado que los jumbos que se empleen en la ejecución de la rampa de acceso se podrían emplear más tarde en la ejecución de las galerías de ejecución. Además de ofrecer una mejor solución en cuanto a trazado se refiere, ya que este método permite un trazado más corto que en un futuro supondrá un ahorro en costes por transporte, ventilación y mantenimiento de la rampa.

6.2.1. Maquinaria

La maquinaria a emplear constará de: un camión articulado de perfil bajo “AD45B” de la marca Caterpillar (Caterpillar, 2018)^[5], para el acarreo de material desde el frente a la zona de vertido; una retro excavadora de quinta botella, concebida para el trabajo en túneles, “R950 Litronic Tunnel” de la marca Liebherr (Liebherr, s.f.)^[11]. Esta máquina realizará las funciones de carga y saneamiento del frente; y un carro perforador o jumbo “Boomer M” de la marca Epiroc (Epiroc, 2019)^[6], con el que se ejecutará la perforación de los barrenos y carga con explosivo de estos.

Debido a las dimensiones del camión, este será el vehículo de referencia en el diseño de la sección.

El jumbo viene definido por la superficie que se desea perforar. El mercado ofrece un gran número de equipos, que se adaptan a un gran número de dimensiones de perforación.



Figura 6.3: Jumbo Boomer M (Epiroc, 2019)^[6].

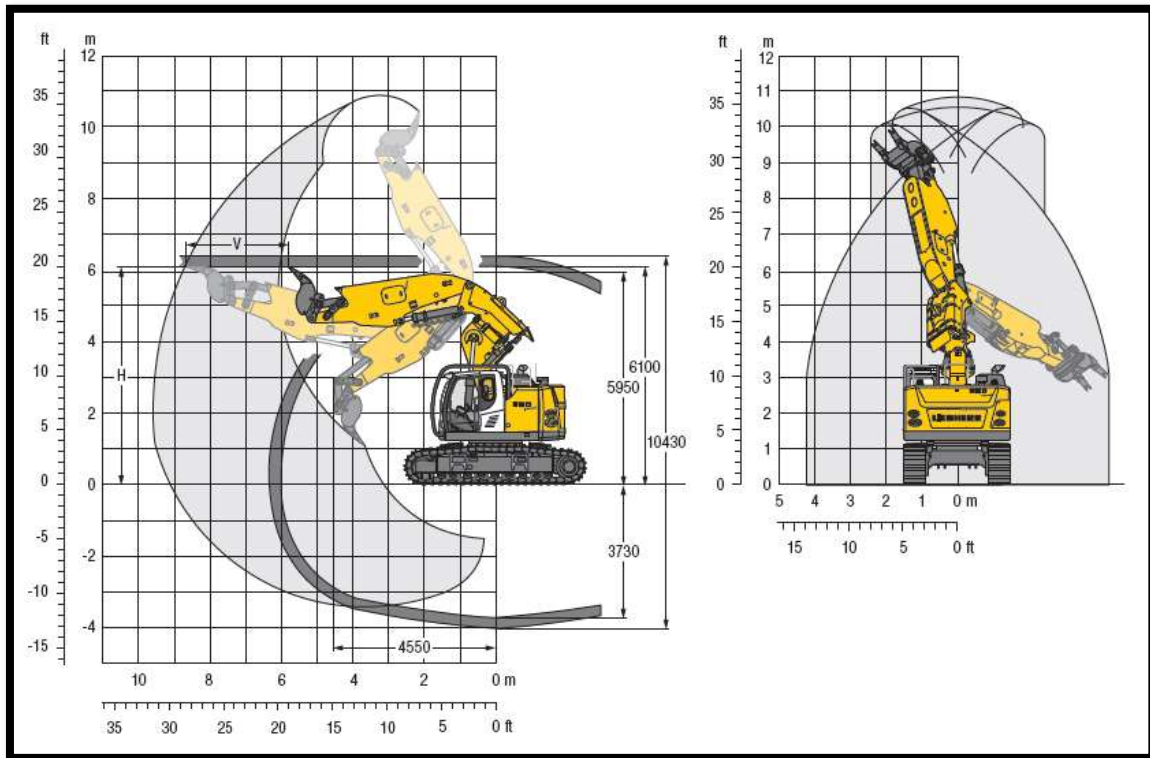


Figura 6.4: Radios de operación de la Liebherr R950 Litronic Tunnel (Liebherr, s.f.)^[11].

6.2.2. Voladura

En la voladura se ha optado por el empleo de un cuele de cuatro secciones con un barreno vacío de gran sección en el centro, que será el encargado de generar una segunda cara libre que permita la salida del resto de la voladura. Esta voladura tendrá un pase de 3,2 metros, ejecutándose a sección completa debido a las dimensiones de esta. El explosivo principal empleado es Riodin (goma) como carga en fondo y Riomex (emulsión) como carga en columna, estas cargas serán detonadas mediante detonador no eléctricos Rionel LP, los cuales son específicos para avances en galerías y cuentan con un retardo mayor. Todo este material explosivo es fabricado por de la marca comercial Maxam (MAXAM, 2019)^[16]. Este tipo de explosivo se ha seleccionado debido a su excelente resistencia al agua, además de una elevada densidad, característica que, unida a su alta potencia y velocidad de detonación, las hacen adecuadas para la carga de barrenos o voladuras de rocas de dureza media/alta. Una vez conocido el proyecto de voladura tipo, se procede al cálculo de esta, lo que nos arroja los siguientes parámetros:



Estudio comparativo del método de tuneladora vs explosivos para rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)



Tabla 6.1: Definición de los parámetros iniciales de diseño de la voladura.

Longitud de perforación (m)	3,2
Diámetro del barreno de expansión (mm)	89
Diámetro del barreno cargado (mm)	32
Densidad del explosivo de fondo (Kg/m ³)	1,5
Densidad del explosivo de columna (Kg/m ³)	1.2
Diámetro de los cartuchos	26
Longitud de barreno de expansión (mm)	2,873

El primer paso es el cálculo de la geometría del cuele central, en este tipo de cuele se calcula en base al diámetro del barreno de expansión (D_2) a partir del cual se colocan los cuatro barrenos que conforman el primer cuele. Estos barrenos forman un cuadrado en el que se sitúa el barreno de expansión en el punto medio del mismo. La distancia del centro a los vértices es la medida denominada "Piedra". Tras este primer cuele se realizará el cálculo del resto de cueles que se encontraran rotados 45º respecto del anterior. A continuación, se exponen las ecuaciones y cálculos realizados:

Tabla 6.2: Ecuaciones y cálculos de los parámetros de diseño del cuele (López Jimeno, 2010)^[13].

Sección del cuele	Piedra	Lado de la sección	Concentración
Primera	$B_1 = 1.5 \times D_2$	$B_1 \times \sqrt{2}$	$q = \frac{0.55 \times 10^{-3} \times d}{32} \times \left(P - \frac{D}{2} \right) \times \left(\frac{2 \times P}{D} \right)^{3/2}$
Segunda	$B_2 = B_1 \times \sqrt{2}$	$1.5 \times B_2 \times \sqrt{2}$	$q = \frac{0.35 \times 10^{-3} \times d \times P}{32} \times \left(\frac{4 \times P^2 + H^2}{H^2} \right)^{3/4}$
Tercera	$B_3 = 1.5 \times B_2 \times \sqrt{2}$	$1.5 \times B_3 \times \sqrt{2}$	
Cuarta	$B_4 = 1.5 \times B_3 \times \sqrt{2}$	$1.5 \times B_4 \times \sqrt{2}$	

Sección del cuele	Piedra (mm)	Lado de sección (mm)	Concentración (Kg/m)	Taco (mm)
Primera	133,500	188,798	0,254	320
Segunda	188,798	400,500	0,172	320
Tercera	400,500	849,589	0,364	320
Cuarta	849,589	1802,250	0,772	320

Una vez calculados los parámetros del cuele, es el momento de definir el resto de la voladura. Esta se compone de:



- Piso: Zona inferior de la voladura y que será la última en detonarse, lo que requiere de un mayor consumo de explosivo debido a su confinamiento por los escombros del resto de la sección.
- Hastiales: Zonas laterales de voladura, esta zona ayuda a perfilar la galería final. Esto hace que se realicen barrenos más juntos y con menor carga, con el fin de concentrar la zona de rotura.
- Techo: Zona superior o clave de la galería, esta presenta las mismas características que los hastiales.
- Destroza: Zona comprendida entre el cuarto cuele y las zonas mencionadas con anterioridad. En ella se definen tres zonas de salida preferente de la voladura en base a la cara libre disponible.
- Recorte: Es el perfilado de la sección completa de la galería, que es disparado tras los cueles. A fin de proteger el macizo del resto de la voladura.

Tabla 6.31: Características de la carga (López Jimeno, 2010)^[13].

Carga resto de la voladura (Kg/m)	$q_f = 7.85 \times 10^{-4} \times d^2 \times \rho$	0,796
Piedra resto de la voladura (m)	$B = 0.88 \times q_f^{0.35}$	0,812



Estudio comparativo del método de tuneladora vs explosivos para rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)



Tabla 6.4: Ecuaciones y cálculos de la voladura para las diferentes secciones (López Jimeno, 2010)^[13].

Zona de Sección	Piedra (m)	Espaciamiento (m)	Longitud de carga en fondo (Lf, m)	Concentración de carga en fondo (qf, Kg/m)	Concentración carga en columna (qc, Kg/m)	Taco (m)
Piso	B	$1.1 \times B$	$L/3$	q_f	q_f	$0.2 \times B$
Hastiales	$0.9 \times B$	$1.1 \times B$	$L/6$	q_f	$0.4 \times q_f$	$0.5 \times B$
Techo	$0.9 \times B$	$1.1 \times B$	$L/6$	q_f	$0.36 \times q_f$	$0.5 \times B$

Destroza						
Hacia Arriba	B	$1.1 \times B$	$L/3$	q_f	$0.5 \times q_f$	$0.5 \times B$
Horizontal	B	$1.1 \times B$	$L/3$	q_f	$0.5 \times q_f$	$0.5 \times B$
Hacia Abajo	B	$1.2 \times B$	$L/3$	q_f	$0.5 \times q_f$	$0.5 \times B$

Recorte	$E/0.8$	$14.5 \times d$	$L - 0.3$	$8.5 \times 10^{-5} \times d^2$		0,300
---------	---------	-----------------	-----------	---------------------------------	--	-------

Zona de Sección	Piedra (m)	Espaciamiento (m)	Longitud de carga en fondo (Lf, m)	Concentración de carga en fondo (qf, Kg/m)	Concentración carga en columna (qc, Kg/m)	Taco (m)	Longitud de carga en columna (m)
Piso	0,812	0,894	1,067	0,796	0,796	0,162	1,971
Hastiales	0,731	0,894	0,533	0,796	0,318	0,406	2,260
Techo	0,731	0,894	0,533	0,796	0,286	0,406	2,260

Destroza							
Hacia Arriba	0,812	0,893	1,067	0,796	0,397	0,406	1,727
Horizontal	0,812	0,893	1,067	0,796	0,397	0,406	1,727
Hacia Abajo	0,812	0,974	1,067	0,796	0,397	0,406	1,727

Recorte	0,580	0,464	2,90	0,087		0,300	
---------	-------	-------	------	-------	--	-------	--

Una vez calculados las dimensiones geométricas y de carga de la voladura, se realiza el diseño de esta, a fin de conocer el número de barrenos que será necesario realizar para el avance de la sección de proyecto.

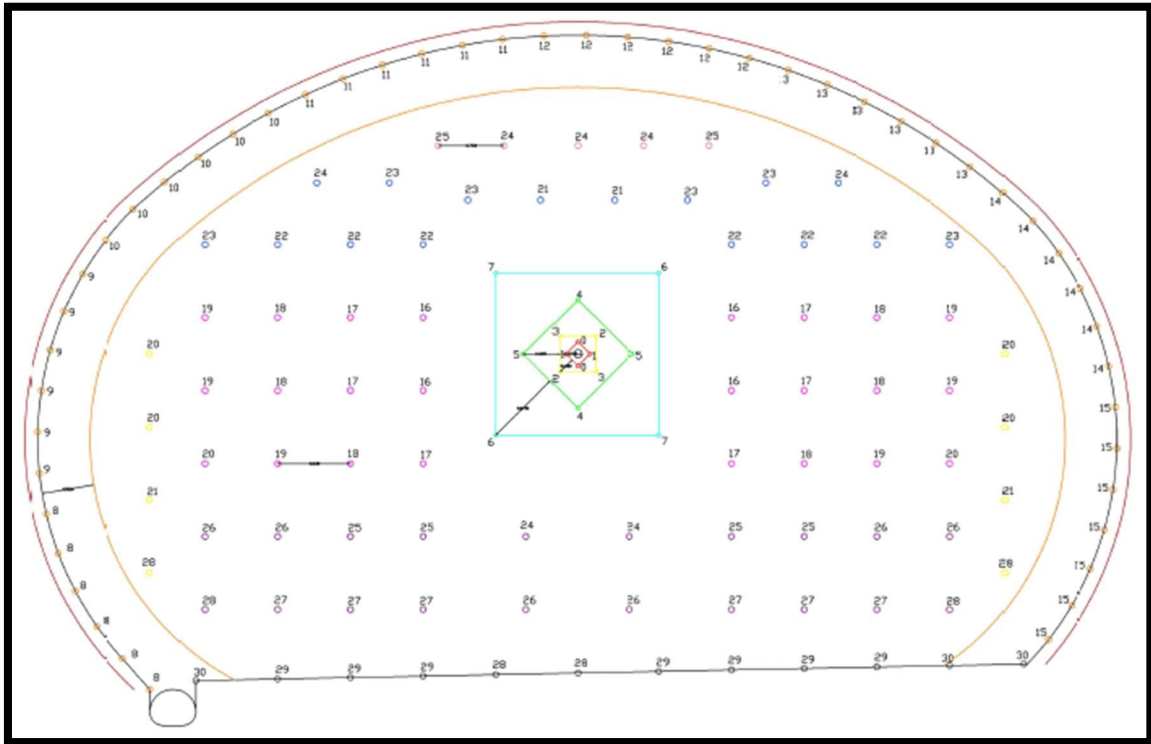


Figura 6.5: Diseño de la voladura.

Una vez establecido el diseño, se procede al calculo de la carga por voladura. Que nos aportará parámetros necesarios a la hora de calcular la ventilación de la galería como se verá en el apartado siguiente.

Tabla 6.5: Calculo de la carga de la voladura (López Jimeno, 2010; Bieniawski, 1989)^[1,13].

Numero de barreros	Sección	Carga en fondo (Kg)	Carga en columnas (Kg)	Carga total de Riodin (Kg)	Carga total de Riomex (Kg)
12	Piso	0,849	1,568	10,188	18,825
8	Hastiales	0,424	0,719	3,396	5,757
5	Techo	0,424	0,647	2,122	3,238
20	Hacia Arriba	0,849	0,687	16,981	13,747
24	Horizontal	0,849	0,687	20,377	16,497
16	Hacia Abajo	0,849	0,687	13,584	10,998
4	1º Cuele	0,732		2,930	
4	2º Cuele	0,494		1,976	
4	3º Cuele	1,048		4,192	
4	4º Cuele	2,223		8,892	
49	Recorte	0,252		12,368	
Total de cada explosivo				97,010	69,064
Total de la voladura				166,074	



6.2.3. Ventilación

La ventilación consta de una manga de ventilación de lona Serpent y un ventilador, ambos de la marca Epiroc (Epiroc, 2019)^[6]. La función del sistema de ventilación es la de evacuar los gases producidos por las voladuras, gases producidos por la maquinaria y mantener las condiciones óptimas de oxígeno, temperatura y polvo que permitan el trabajo de los operarios. Estas condiciones están regladas en instrucciones técnicas complementarias (RGNBSM, 2005)^[21]. Estas medidas se toman con el fin de salvaguardar la salud de los trabajadores, así como, posibles explosiones o intoxicaciones producidos por los gases las labores o bien fruto de la mineralización.

En el cálculo de la voladura se van a tener en cuenta los siguientes parámetros: potencia instalada máxima durante la realización del ciclo perforación-voladura; Calor desprendido por los equipos, personal y paredes de la galería; Caudal de retorno y temperatura máxima interior.

- Potencia Instalada

En primer lugar, se analiza la potencia de las máquinas intervinientes en las diferentes fases del ciclo perforación-voladura, estas potencias son:

Tabla 6.6: Potencias instaladas durante el ciclo.

Ciclo constructivo	Unidades	Equipo	Modelo	Potencia Diésel (kW)	Potencia eléctrica (kW)	Potencia total (kW)	Total del ciclo
Perforación	1	Jumbo	Epiroc Boomer S2		118	118	378
	1	Todoterreno	Toyota Hilux	110		110	
	1	Retroexcavadora	Liebherr R950 Tunnel	150		150	
Carga de explosivos	1	Jumbo	Epiroc Boomer S2		118	118	118
Voladura							
Ventilación							
Desescombro	1	Dumper		438		438	588
	1	Retroexcavadora	Liebherr R950 Tunnel	150		150	
Saneo	1	Retroexcavadora	Liebherr R950 Tunnel	150		150	150

La mayor potencia instalada se produce durante el desescombro, donde se encuentra una potencia de 588 kW de forma simultánea.



- Caudal de aire para la respiración de las personas

Según la I.T.C 04.07.01 (RGNBSM, 2005)^[21] establece un caudal de aire de 40l/s. para cubrir las necesidades de una persona que se encuentra desarrollando un esfuerzo. Se estima que habrá 7 personas de forma simultanea en el caso más desfavorable se obtiene:

$$Q_1 = N^{\circ} \text{ Personas} \times 40 = 7 \times 40 = 280 = 0.28 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Caudal de aire para mantener la velocidad de corriente de retorno

Se desea mantener la velocidad de retorno de 0.25 m/s establecida en las I.T.C 04.7.01 (RGNBSM, 2005)^[21], que establece que la velocidad de retorno tiene que estar comprendida entre 0.2 y 8 m/s, siempre que estas sean suficientes para la dilución de los gases y polvo.

$$Q_2 = S \times V = 71.55 \times 0.25 = 17.88 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Caudal de aire para eliminar gases en la voladura

Se considera que para realizar un avance de 3,2 metros en una sección de 71,55 m², se necesitan 166,07 Kg de explosivo. Si se estima un tiempo de purga de 35 min, el caudal será:

$$Q_3 = 0,166 \times \text{Explosivo} = 0,166 \times 166,07 = 27,56 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Caudal necesario para diluir los gases de combustión de la maquinaria

Este caudal se calcula a partir de la potencia más desfavorable durante el ciclo calculada anteriormente, en la que se encuentran trabajando maquinaria por un valor de 588 Kw durante el desescombro de la voladura. De acuerdo con la normativa aplicable a túneles, se requerirá el siguiente caudal:

$$Q_4 = 0,066 \times P_{kW} = 0,066 \times (588 \times 0,7) = 27,16 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Caudal de aire necesario para la disipación del calor

La I.T.C. 04.7.05 (RGNBSM, 2005)^[21] establece la temperatura máxima de trabajo en explotaciones subterráneas como un máximo de 30°C. Si la humedad relativa se encuentra entre el 50 – 70% y velocidades de aire de 0,25 – 0,50 m/s.

Dentro de la rampa encontraremos los siguientes elementos que contribuyen al aumento de la temperatura en el interior de esta:

- Calor que puede desprender el macizo rocoso (Temperatura media = 22°C)

$$W_1 = 0,2 \times 10^{-3} \times 95130.36 = 19,02 \text{ kW}/^{\circ}\text{C}$$



Estudio comparativo del método de tuneladora vs explosivos para rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)



- Calor desprendido por el personal (0.25 kW/persona)

$$W_2 = 0,25 \times 7 = 1,75 \text{ kW}$$

- Calor desprendido por los equipos eléctricos (jumbo): 0,1 kW de energía calórica por cada kW de potencia instalada.

$$W_3 = 0,1 \times 118 = 11,8 \text{ kW}$$

- Calor desprendido por los equipos diesel: 0,9 kW de energía calórica por cada kW diesel instalado.

$$W_4 = 0,9 \times 588 = 529,2 \text{ kW}$$

Por tanto, el calor producido en el túnel será:

$$W = 19,2 + 1,75 + 11,8 + 529,2 = 561,77 \text{ kW} = 134,17 \text{ kcal/s}$$

El caudal de aire necesario para disipar este calor hasta una temperatura máxima del aire de 30°C es:

$$Q_5 = \frac{W \left(\text{Kcal/s} \right)}{C_{\text{especifico del aire}} \left(\text{Kcal/Kg} \times ^\circ\text{C} \right) \times \Delta T} \times V_{\text{especifico del aire}} \left(\text{m}^3/\text{Kg} \right)$$
$$Q_5 = \frac{134,14}{0,24 \times 30} \times 0,85 = 15,84 \text{ m}^3/\text{s}$$

Calculados los caudales mínimos necesarios, se aprecia que el más desfavorable es el caudal requerido para la dilución de los gases de la voladura. Por tanto, este será con el que realizará el dimensionamiento de la instalación.

- Diámetro de la tubería de ventilación

$$D = 0,225 \times Q^{0,5} = 0,225 \times 27,56^5 = 1,18 \text{ m}$$

Se selecciona 1,25 m de diámetro debido que es la medida mayor y más próxima de fabricante Epiroc (Epiroc, 2019)^[6].

- Velocidad del aire en la tubería

$$VF = Q/s = 27,56 / (\pi \times 0,625^2) = 22,46 \text{ m/s}$$

- Presión dinámica

$$P_F = \gamma \times \frac{(VF)^2}{2g} = 1,293 \times \frac{22,46^2}{2g} = 332,9 \text{ Pa}$$



- Pérdidas de carga

$$\Delta H = \frac{g \times 0,1 \times 0,003 \times L \times Q}{D^5} = \frac{9,8 \times 0,1 \times 0,003 \times 2949,77 \times 27.56}{1,18^5}$$

$$= 2159,65 \text{ Pa}$$

- Potencia del ventilador

$$P = Q \times \Delta H / 0,75 = \frac{27,56 \times (2159,65 + 332,9)}{0,75} = 91,61 \text{ kW}$$

Con el dimensionamiento calculado se acude a los ábacos que ofrece la marca Epiroc, para la selección del equipo más adecuado. En estos, se tiene en cuenta el diámetro, caudal, altura y potencia.

Dimensions												
	AVH63	AVH71	AVH80	AVH90	AVM 90	AVH100	AVM 112	AVH125	AVH140	AVH160	AVH180	AVH224
L1 Length (mm/Inch)	3 398/133.8	3 504/138.0	4 686/184.5	4 084/160.8	4 084/160.8	4 189/164.9	4 926/193.9	6 000/236.2	6 000/236.2	7 200/283.5	7 303/287.5	8 470/333.5
L2 Length (mm/Inch)	4 448/175.1	4 704/185.2	5 588/220	5 464/215.1	5 464/215.1	5 574/219.4	6 426/253.0	7 600/299.2	7 600/299.2	9 000/354.3	9 203/362.3	10 570/416.1
L3 Length (mm/Inch)	5 498/216.5	5 904/232.4	6 490/255.5	6 844/269.4	6 844/269.4	6 959/274.0	7 926/312.0	9 200/362.2	9 200/362.2	10 800/425.2	11 103/437.1	12 670/498.8
L4 Length (mm/Inch)	6 548/257.8	7 104/279.7	7 392/291	8 224/323.8	8 224/323.8	8 344/328.5	9 426/371.1	10 800/425.2	10 800/425.2	12 600/496.1	13 003/511.9	14 770/581.5
Inner diameter (mm/Inch)	630/24.8	710/28	800/31.4	900/35.4	900/35.4	1 000/39.4	1 120/44.1	1 250/49.2	1 400/55.1	1 600/63	1 800/70.9	2 240/88.2
D1 Diameter (mm/Inch)	871/34.3	955/37.6	1 035/40.7	1 172/46.1	1 172/46.1	1 275/50.2	1 420/55.9	1 543/60.7	1 728/68.0	1 941/76.4	2 144/84.4	2 595/102.2
D2 Diameter (mm/Inch)	904/35.6	980/38.6	1 140/44.8	1 155/45.5	1 155/45.5	1 255/49.4	800/31.5	1 578/62.1	1 815/71.5	1 985/78.1	2 229/87.8	2 590/102.0
H1 Height, from bottom to fan center point (mm/Inch)	440/17.3	470/18.5	709/27.9	551/21.7	551/21.7	581/22.9	1 438/56.6	794/31.3	956/37.6	1 026/40.4	1 170/46.1	1 315/51.8
Weight, fan unit (depending on motor) (kg)	approx. 360	approx. 500	approx. 800	approx. 1 000	approx. 1 000	approx. 1 250	approx. 1 400	approx. 1 500	approx. 1 460	approx. 2 100	approx. 3 550	approx. 5 800

Figura 6.6: Dimensiones de los diferentes modelos de ventilador (Epiroc, 2019)^[6].

Technical data												
	AVM 90**	AVM 112**	AVH63	AVH71	AVH80**	AVH90	AVH100	AVH125	AVH140	AVH160	AVH180	AVH224
Approximate flow rate (m³/s)	8-22	13-32	3-9	4-13	6-20	8-22	10-24	14-42	20-48	22-70	40-120	<200
Approximate flow rate (ft³/min)	16 951-46 615	27 545-67 804	6 357-19 071	8 476-27 547	12 713-42 377	16 952-46 618	21 190-50 856	29 666-88 998	42 380-101 712	46 618-148 330	84 760-254 280	<423 800
1-stage (kPa/Inch H2O)*	43-41	2-101	13-22/ 52-88	13-23/ 52-92	13-20	35-43/ 140-173	38-44/ 153-177	15-26/ 60-104	12-22/ 48-88	13-22/ 52-88	15-35/ 60-141	10-20/ 40-80
2-stage (kPa/Inch H2O)*	-	-	25-45/ 100-181	26-46/ 104-185	-	70-86/ 281-345	73-87/ 293-349	29-51/ 116-205	23-43/ 92-173	25-43/ 100-173	30-70/ 120-281	15-40/ 60-161
3-stage (kPa/Inch H2O)*	-	-	40-65/ 161-261	41-66/ 165-265	-	101-125/ 405-502	103-126/ 414-506	45-77/ 181-309	35-64/ 141-257	38-64/ 153-257	50-103/ 201-414	20-57/ 80-229
4-stage (kPa/Inch H2O)*	-	-	50-75/ 201-301	52-85/ 209-341	-	128-160/ 514-642	129-162/ 518-650	60-95/ 241-381w	46-95/ 185-381	51-85/ 205-341	-	-
Nominal power (50Hz) (kW)	30-37	55-30	55-30	75-37	30-55	37-110	37-110	37-110	37-132	37-200	132-500	110-400
Impeller blades (pcs)	8	8	8	8	8	8	8	8	8	10	10	10/12

Figura 6.7: Ábaco de potencias y caudales de los diferentes modelos de ventilador (Epiroc, 2019)^[6].

El modelo que se correspondería con las dimensiones de instalación sería el modelo AVH125, el cual presenta un diámetro de salida de 1,25 metros al igual que la tubería propuesta. Los caudales de funcionamiento se situarían entre 14 – 42 m³/s, con lo que se cubrirían los requerimientos de ventilación. Además, sus rangos de potencia entre 37-110 kW son suficientes para cubrir los 91 kW calculados anteriormente para la instalación.



**Estudio comparativo del método de
tuneladora vs explosivos para
rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)**

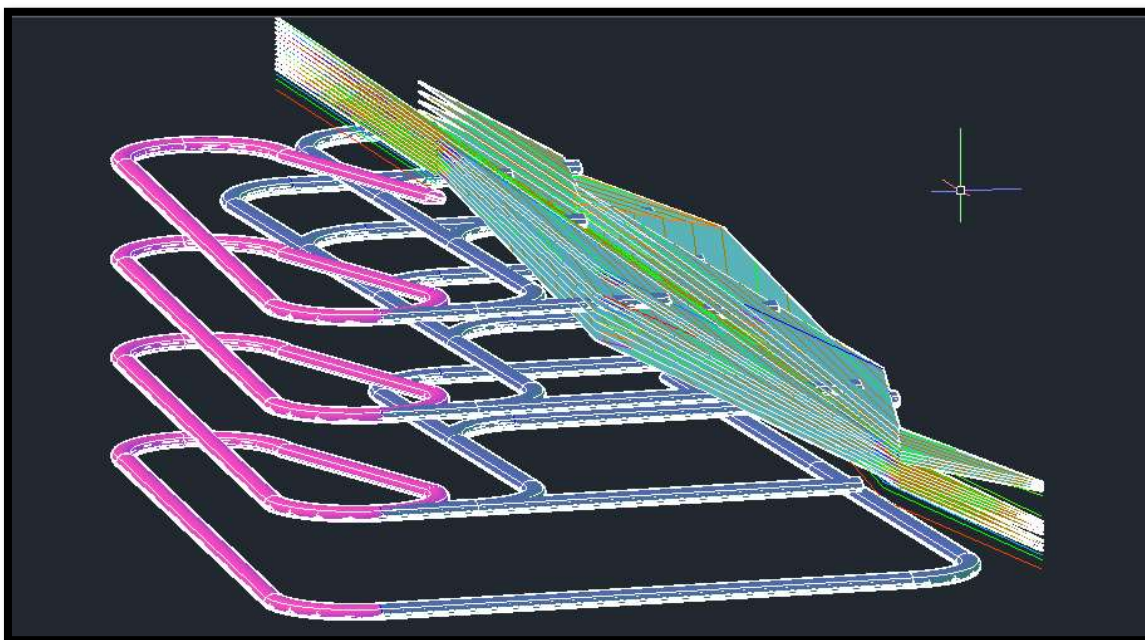


Figura 6.8: Diseño de explotación.



DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Queda claro después de este estudio, que el ámbito de aplicación de ambos métodos depende en primer lugar de la zona de aplicación, donde directamente se podría descartar el empleo de perforación y voladura en macizos que no sean competentes, a favor de tuneladoras cerradas o escudos.

En segundo lugar y no por ello menos importante, el tipo de desarrollo que se quiere llevar a cabo, dado que este es un elemento muy identificativo entre estas dos metodologías. Aquellas obras de gran longitud y con amplios radios de giro serán idóneas para el empleo de tuneladoras, mientras que el método más favorable en las obras de corto desarrollo y con bajos radios será la perforación y voladura.

Desde el punto de higiene y salud, el método de avance mediante tuneladora presenta menores requerimientos de ventilación debido a que presenta un aire mucho más limpio que el proveniente de una perforación o una voladura, donde tenemos los gases producidos en la propia voladura, el polvo generado por la perforación de los barrenos (corregible con sistemas supresores de polvo o con inyectores de agua en frente) o los gases de la maquinaria Diesel empleada para las labores.

En conclusión, este tipo de obras mineras se limitará en la práctica al método de perforación y voladura o cualquier otro método que presente un carácter de flexibilidad en el trazado de las galerías y que presenten las menores restricciones posibles. Se podrán emplear las tuneladoras en servicios auxiliares como puede ser la ejecución de una galería para la colocación de una cinta transportadora.

Teniendo en cuenta el diseño que se ha realizado para su ejecución de la rampa de acceso mediante perforación y voladura, se podría llegar a considerar la reducción de sección a una pista de un solo carril con apartaderos y estructura abovedada con una plataforma de 5 metros. La elección de una y otra sección no influye en el diseño del trazado, sino que esta decisión se debe de tomar en base a las cifras de producción que se espera tener en la explotación y por tanto al número de camiones que trabajan simultáneamente en el acarreo.

También, se puede considerar la posibilidad de realizar la rampa en forma de ocho del trazado en planta. Esto permitiría igualar los desgastes de las ruedas de los camiones que participan en el transporte, por el contrario, este tipo de diseños generan debilidades estructurales en la zona de cruce de las galerías.



Estudio comparativo del método de
tuneladora vs explosivos para
rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bieniawski, R., 1989. *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley.
- [2] Bioducto, medio ambiente e ingeniería civil, s.f. *La mina de wolframio de Barruecopardo*. [En línea]
Available at: <http://bioducto.blogspot.com/2011/08/la-mina-de-wolframio-de-barruecopardo.html>
- [3] Cartografía del Instituto Geológico y Minero de España, s.f. *Cartografía del Instituto Geológico y Minero de España*. [En línea]
Available at: <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/>
- [4] Castillo Anyosa, B., 2015. *Método de Explotación Subterránea: Sublevel stoping*. [En línea]
Available at: <https://es.slideshare.net/BraulioCastilloAnyos/sublevel-stoping-48585372>
[Último acceso: 12 02 2019].
- [5] Caterpillar, 2018. *Caterpillar*. [En línea]
Available at: https://www.cat.com/es_ES.html
- [6] Epiroc, 2019. *Epiroc*. [En línea]
Available at: <https://www.epiroc.com/es-es>
- [7] Instituto Geográfico Nacional, s.f. *Instituto Geográfico Nacional*. [En línea]
Available at: <http://www.ign.es/iberpix2/visor/>
- [8] Instituto Geológico y Minero de España, s.f. *Instituto Geológico y Minero de España*. [En línea]
Available at: <http://www.igme.es/>
- [9] Junta de Castilla y León, s.f. *Energía y Minería en Castilla y León*. [En línea]
Available at: [https://energia.jcyl.es/web/jcyl/Energia/es/Plantilla100/1267710822752/ / /](https://energia.jcyl.es/web/jcyl/Energia/es/Plantilla100/1267710822752/)
- [10] Junta de Castilla y León, s.f. *Inventario de la documentación técnica sobre Proyectos Geológicos y Mineros*. [En línea]
Available at: <https://energia.jcyl.es/web/jcyl/Energia/es/Plantilla100/1284271239352/ / />
- [11] Liebherr, s.f. *Liebherr*. [En línea]
Available at: <https://www.liebherr.com/es/esp/inicio/página-de-inicio.html>
- [12] Litoteca de sondeos del Instituto Geológico y Minero de España, s.f. *Litoteca de sondeos del Instituto Geológico y Minero de España*. [En línea]
Available at: <http://info.igme.es/litoteca/default.asp>



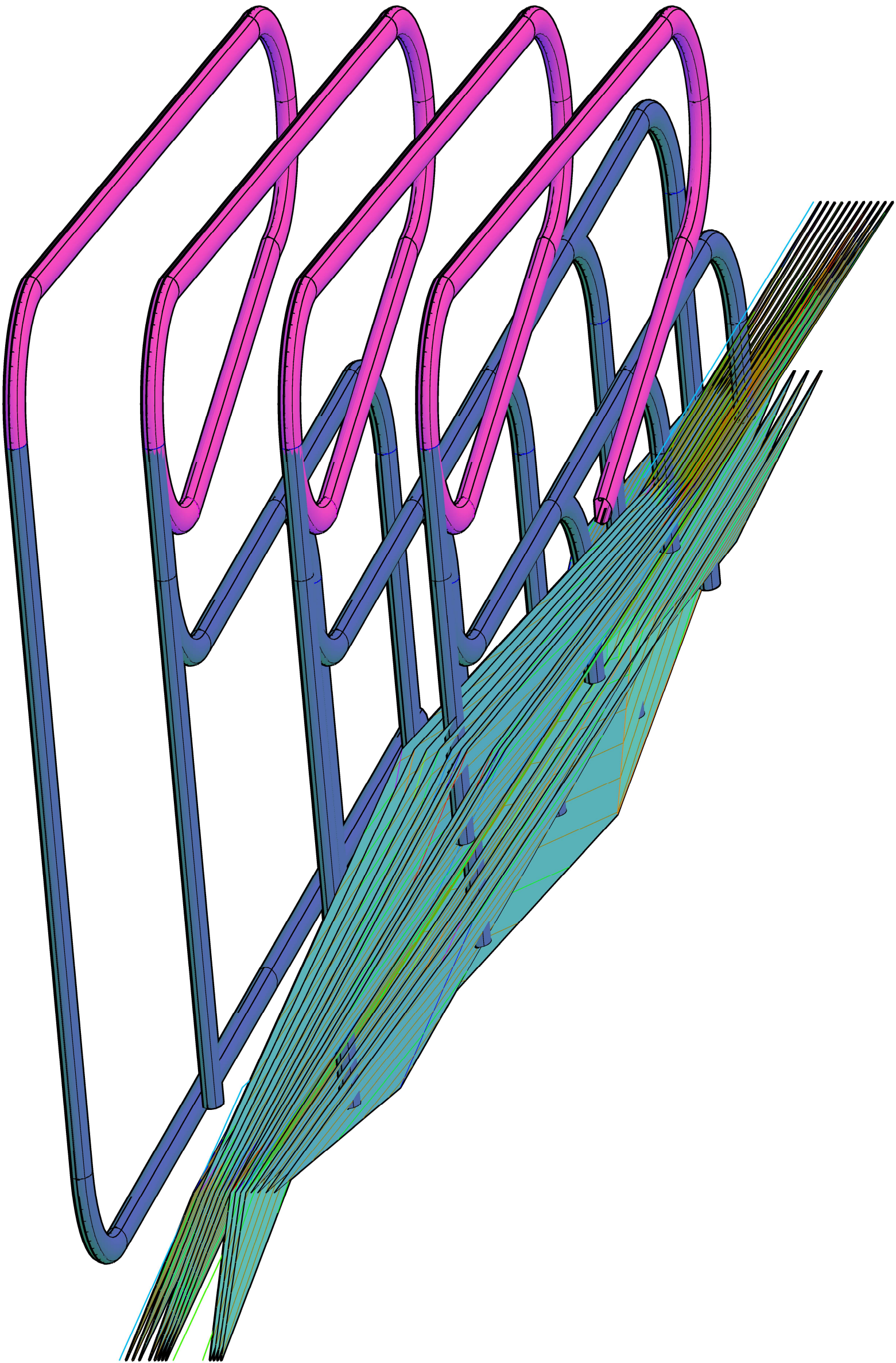
- [13] López Jimeno, C., 2010. *Manual de voladuras en túneles*. Madrid: Gráficas Arias Moreno, S.A..
- [14] López Jimeno, C., 2011. *Manual de túneles y obras subterráneas 1*. Madrid: Gráficas Arias Montano, S.A..
- [15] López Jimeno, C., 2011. *Manual de túneles y obras subterráneas 2*. Madrid: Gráficas Arias Montano, S.A..
- [16] MAXAM, 2019. MAXAM. [En línea]
Available at: http://www.maxam.net/es/terra_solutions
- [17] Mineralogía Topográfica Ibérica, 2007 - 2011. *Mineralogía Topográfica Ibérica*. [En línea]
Available at: <https://mti-minas-castillayleon.blogspot.com/2009/09/coto-minero-merladet.html>
- [18] NG Nair, 2019. Nair18. [En línea]
Available at: <http://nair18.blogspot.com/2012/03/development-of-underground-metal-mine.html>
[Último acceso: 18 Febrero 2019].
- [19] Ormonde Mining PLC, 2011 - 2016. *Ormonde Mining PLC*. [En línea]
Available at: <http://ormondemining.com/>
- [20] Putzmeister, s.f. Putzmeister. [En línea]
Available at: <http://bestsupportunderground.com/>
- [21] RGNBSM, 2005. *Reglamento general de normas básicas de seguridad minera*. Madrid: División de Información, Documentación y Publicaciones, D.L.
- [22] Saloro, s.f. Saloro. [En línea]
Available at: <http://saloro.com/es/>
- [23] Sandvik, s.f. Sandvik. [En línea]
Available at: <https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/mechanical-cutting-equipment/roadheaders-for-tunneling/mt361-roadheader-for-tunneling/>
[Último acceso: 18 Febrero 2019].
- [24] Schmaeh, P., 2015. *Interempresas.net*. [En línea]
Available at: <http://www.interempresas.net/ObrasPublicas/Articulos/147763-Tuneles-mecanizados-en-proyectos-hidroelectricos.html>
- [25] SIEMCALSA, 2018. *Proyectos*. [En línea]
Available at: <http://www.siemcalsa.com/index.php/mineria-metalica/60-wolframio-qbarruecopardoq>

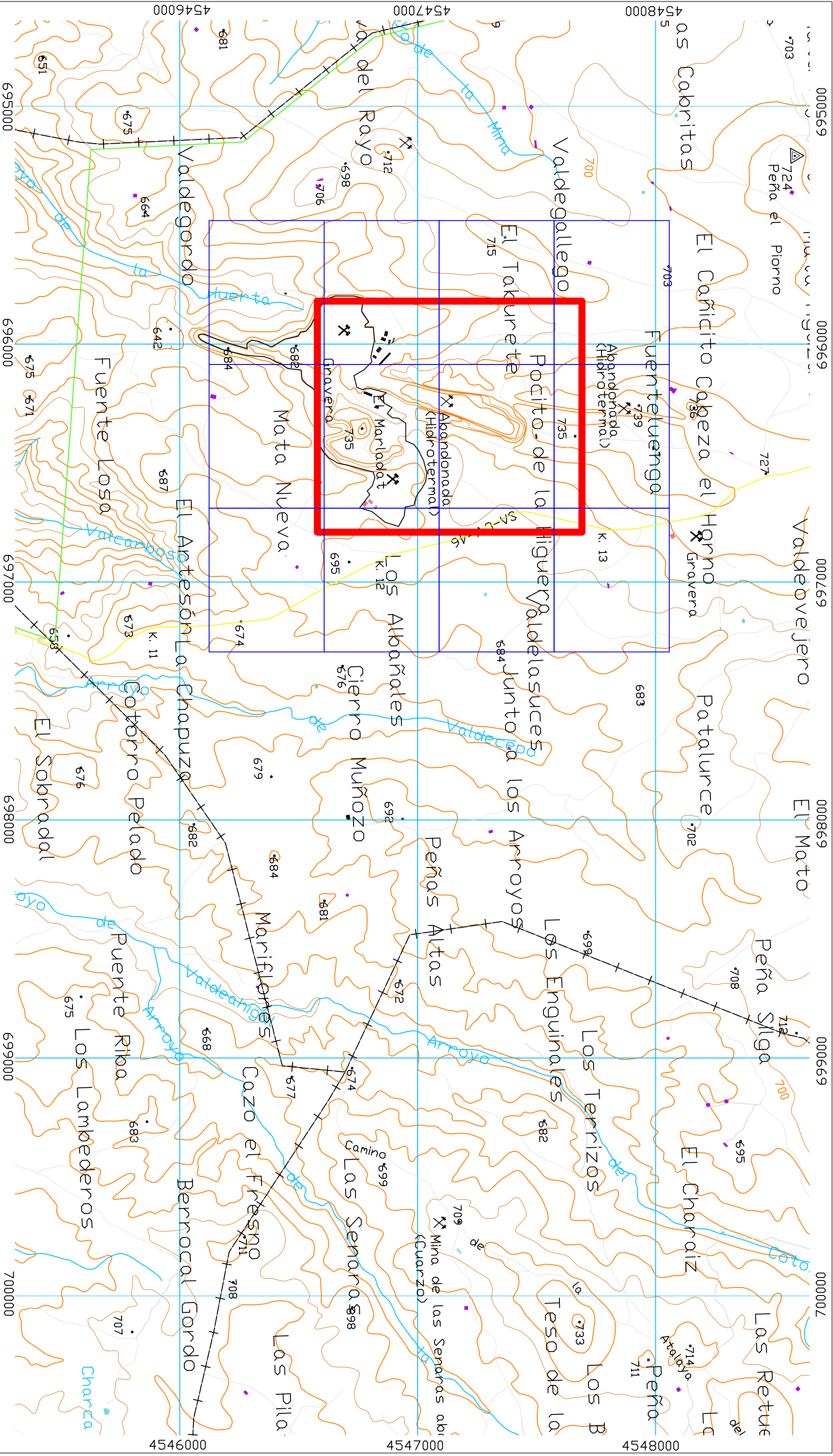


**Estudio comparativo del método de
tuneladora vs explosivos para
rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)**



PLANOS





Leyenda

- Area del proyecto
- Cuadrícula minera

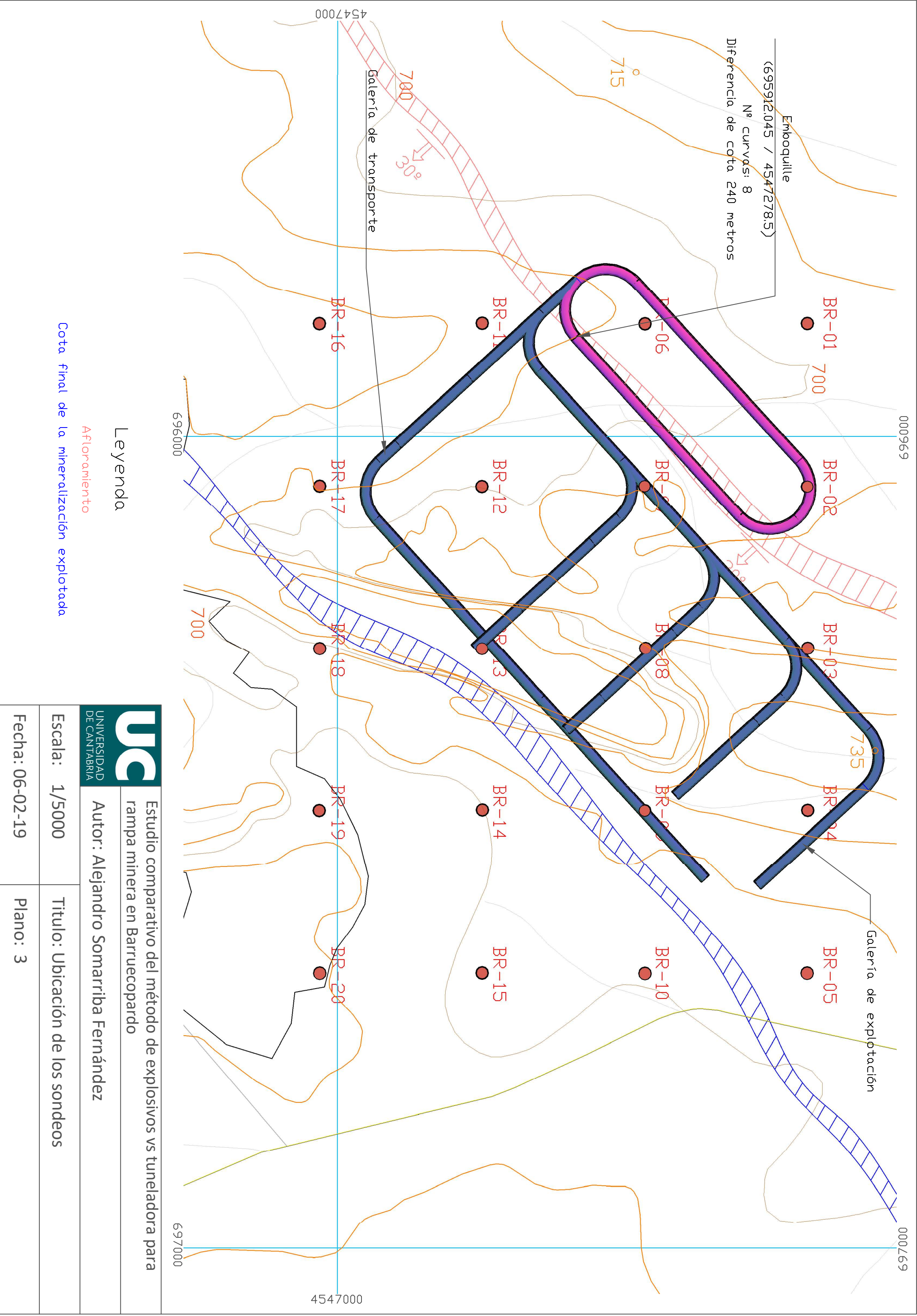
UC

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Estudio comparativo del método de explosivos vs tuneladora para rampa minera en Barruecopardo

Autor: Alejandro Somarriba Fernández

Escala: 1/15000	Título: Ubicación general
Fecha: 06-01-19	Plano: 2



Leyenda

Afloramiento

Cota final de la mineralización explotada

UC

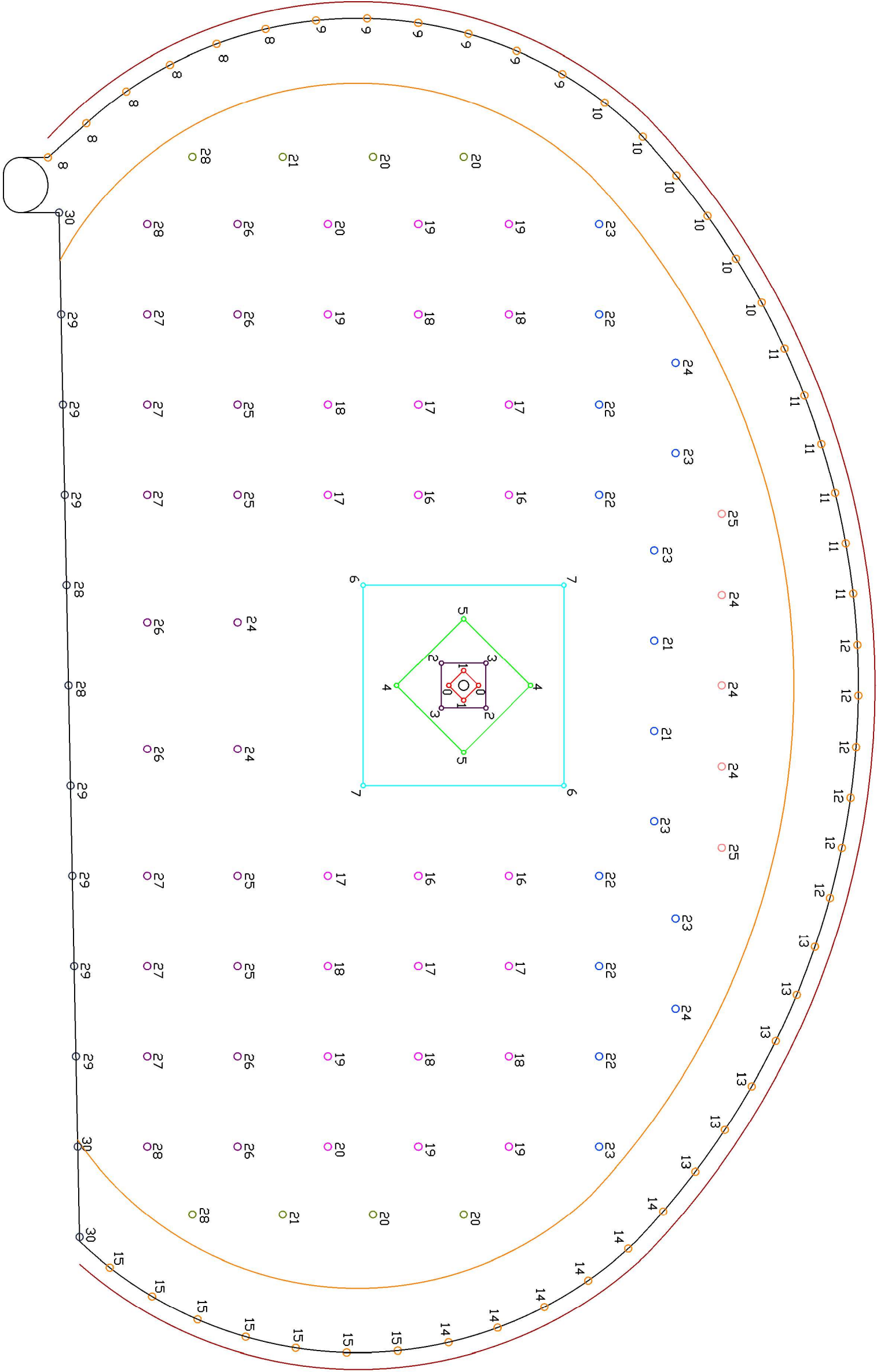
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Estudio comparativo del método de explosivos vs tuneladora para rampa minera en Barruecopardo

Autor: Alejandro Somarriba Fernández

Escala: 1/5000	Título: Ubicación de los sondeos
Fecha: 06-02-19	Plano: 3

Nº Secuencia	Retardo (ms)
0	0
1	100
2	200
3	300
4	400
5	500
6	600
7	700
8	800
9	900
10	1000
11	1100
12	1200
13	1300
14	1400
15	1500
16	1600
17	1700
18	1800
19	1900
20	2000
21	2100
22	2200
23	2300
24	2400
25	2500
26	2600
27	2700
28	2800
29	2900
30	3000



Leyenda

- Primer cuele

Segundo cuele

Tercer cuele

Cuarto cuele

Línea de abono

Recorte
- Destroza con salida horizontal

Destroza con salida hacia arriba

Destroza con salida hacia abajo

Barrenos de techo

Barrenos de hastial

Barrenos de pie

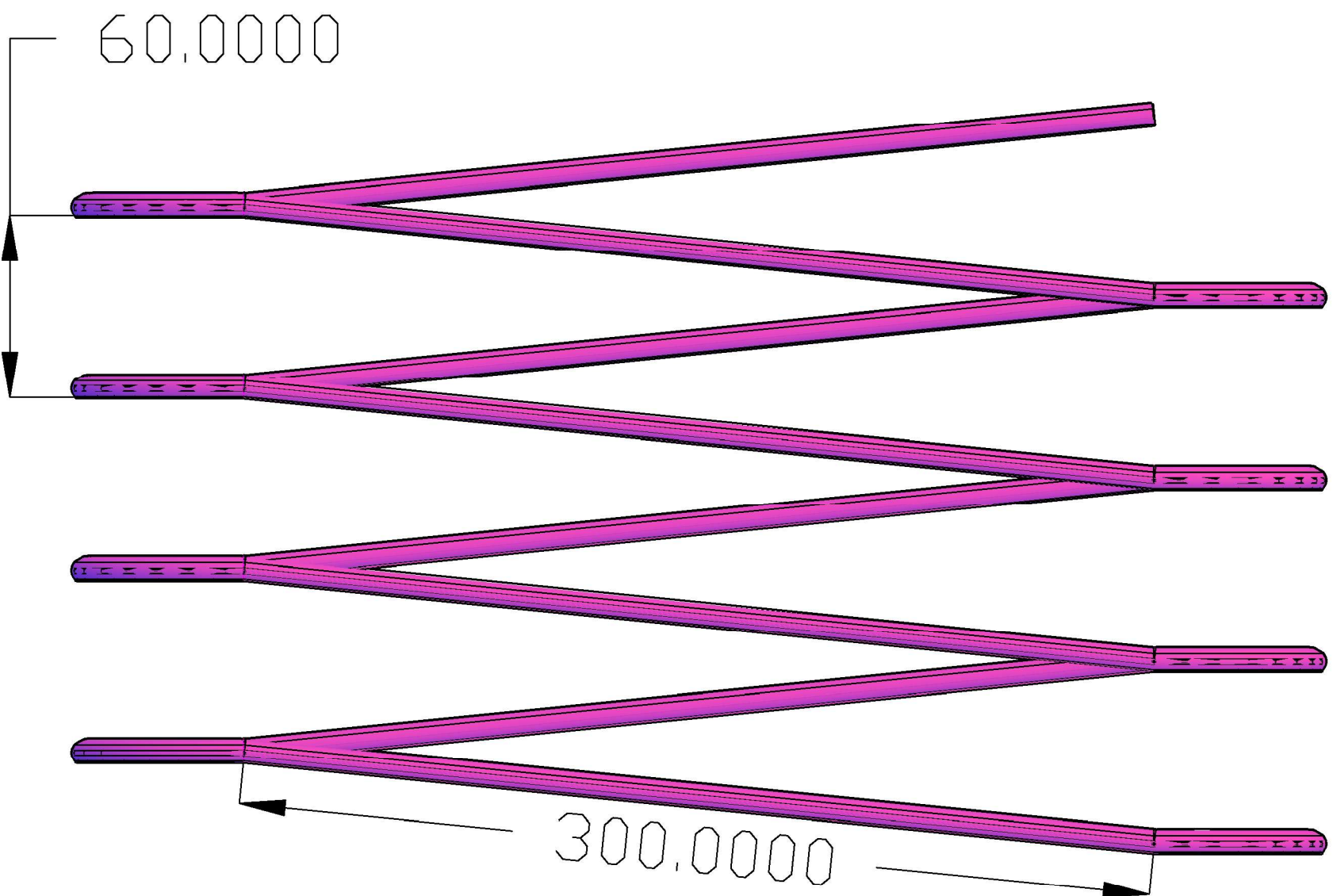
UC

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Estudio comparativo del método de explosivos vs tuneladora para rampa minera en Barruecopardo

Autor: Alejandro Somarriba Fernández

Escala: 1/40	Título: Esquema tiro de Voladura tipo
Fecha: 28-01-19	Plano: 5



Estudio comparativo del método de explosivos vs tuneladora para
rampa minera en Barruecopardo

Autor: Alejandro Somarriba Fernández

Escala: 1/500

Título: Dimensiones de la rampa

Fecha: 06-02-19

Plano: 6